



**David José Moutinho Russo Santos Heitor**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Classificação da Intensidade Energética no Litoral de Espinho**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Francisco Eduardo da Ponte Sancho, Investigador Auxiliar, LNEC  
Co-orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, Professora Doutora,  
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Cornelius Cismasiu

Arguente: Prof. Mário J. Franca

Vogais: Prof. Doutor Francisco Eduardo da Ponte Sancho

Prof. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves



**FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**Fevereiro de 2014**





**David José Moutinho Russo Santos Heitor**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Classificação da Intensidade Energética no Litoral de Espinho**

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Francisco Eduardo da Ponte Sancho, Investigador Auxiliar, LNEC  
Co-orientadora: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, Professora Doutora,  
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Cornelius Cismasiu

Arguente: Prof. Mário J. Franca

Vogais: Prof. Doutor Francisco Eduardo da Ponte Sancho

Prof. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Fevereiro de 2014**



‘Copyright’ David José Moutinho Russo Santos Heitor, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço, ao meu orientador, Professor Doutor Francisco Sancho, por todo o inestimável conhecimento, apoio e disponibilidade transmitido ao longo de todo este trabalho. Professora Doutora Maria da Graça Neves, um muito obrigado, pela possibilidade que me deu em trabalhar sobre este tema e, também, pela disponibilidade, conhecimento prestado e ajuda no decorrer destes meses. A possibilidade de estagiar no Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC, possibilitou uma maior proximidade com os orientadores, agradeço assim, à Professora Dr.<sup>a</sup> Graça e ao Professor Dr. Francisco, por esta oportunidade.

Muito obrigado ao Engenheiro Francisco Silva, pela ajuda e conhecimento transmitido no SWAN.

Um agradecimento especial ao Oficial da Marinha Portuguesa, Cmdt. Ventura Soares, pela disponibilidade em facultar o acesso às instalações do Instituto Hidrográfico. Agradeço também, a ajuda no SWAN e *MATLAB*<sup>®</sup>, do investigador do IH, Ilmer van Golde.

A todos os meus amigos, obrigado pelo apoio, companheirismo e boa vida que me proporcionaram durante todo o meu percurso académico.

Agradeço à minha mãe, por me ter motivado ao longo de todo o meu tempo universitário. Não há motivação melhor.

Andreia, obrigado pela tua preciosa paciência. Agradeço-te por me teres apoiado e dado a maior força quando mais precisei.

Pai e João, esta é por vocês....





## RESUMO

A costa ocidental portuguesa, devido à influência da forte agitação vinda do Atlântico é, muitas vezes, atingida por temporais. A erosão costeira associada à agitação marítima é um problema grave a considerar na gestão do litoral. Em particular no litoral de Espinho, onde desde há mais de um século têm ocorrido problemas de erosão e destruição de património devido a fortes tempestades marítimas, tornou-se necessário proteger essa zona, de forma a prevenir e minimizar os riscos de erosão e inundações.

Nesta dissertação propõe-se classificar a intensidade energética associada a períodos de tempestade no litoral de Espinho, adaptando a este caso de estudo a metodologia utilizada por *Mendoza e Jimenez* (2011) para o litoral da Catalunha. Para tal, primeiramente, estimaram-se as condições de agitação marítima em 26 pontos distribuídos ao longo de 12,5 km, à profundidade de 15 m (ZH), paralelamente ao litoral de Espinho, através da propagação das condições de agitação marítima ao largo recorrendo ao modelo numérico de geração e previsão de agitação marítima SWAN. As condições na fronteira oceânica deste modelo foram definidas pela série de dados estimados ao largo da Figueira de Foz (*Dodet et al.*, 2010) para o período entre 1 de Janeiro de 1953 e 31 de Março de 2009. Com base nas séries temporais locais de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção de onda ( $D$ ) obtiveram-se as durações, a intensidade energética, os valores máximos e médios de altura de onda significativa e período de pico e as direcções de onda em cada temporal.

Através destes resultados, propôs-se uma classificação da intensidade energética associada a temporais, baseada em *Mendoza e Jimenez* (2011), com as seguintes classes: Fraca, Moderada, Significativa, Severa e Extrema. Verifica-se que o litoral de Espinho pertence totalmente à classe de intensidade Severa, embora com maior intensidade a norte que a sul do troço classificado. Verifica-se também que a intensidade energética é fortemente correlacionada com a duração do temporal e, em menor grau, com a altura significativa máxima do mesmo.

Finalmente discutem-se os resultados das intensidades energéticas obtidos a partir da definição de diferentes limiares do valor da altura de onda significativa (3 m, 4 m e 5 m), obtendo-se assim, diferentes valores do número total de períodos de tempestade anuais. Igualmente discutem-se as diferenças entre os resultados obtidos através de mais duas propostas de classificação de temporais distintas da definida por *Mendoza e Jimenez* (2011). Verifica-se que aumentando os limiares da intensidade energética associados às classes superiores se obtém uma (desejável) distribuição decrescente do número de temporais das classes mais baixas para as maiores. Contudo, a nova classificação carece de validação em outras zonas.

Termos chave: SWAN; Espinho; Agitação Marítima; Intensidade Energética; Tempestade.



## ABSTRACT

The west coast of Portugal due to the influence of agitation coming from the Atlantic Ocean is often hit by storms. Coastal erosion associated with sea waves is a serious issue to consider in the coastal management. Particularly in coastal of Espinho, where for more than a century have been problems of erosion and destruction of assets due to strong sea storms, it became necessary to protect this area in order to prevent and minimize the risk of erosion and flooding .

This dissertation proposes to classify the energy density associated to periods of storm on the coast of Espinho, adapting to this case study the methodology used by *Mendoza and Jimenez* (2011) to the Catalan coast. To do this, first it was estimated the conditions of sea waves in 26 points spread over 12,5 km at a depth of 15 m (HZ), parallel to the coast of Espinho, through the propagation conditions of the deep sea waves using the numerical model generation and prediction of sea waves SWAN. The model's offshore boundary conditions were given by hindcast data off Figueira de Foz (Dodet *et al.*, 2010) for the period between January 1, 1953 and March 31, 2009. Based on the time series of local significant wave height ( $H_s$ ), peak period ( $T_p$ ) and wave direction ( $D$ ) were obtained durations, energy intensity, the maximum and mean values of significant wave height and peak period and wave directions in each period.

Through these results, we proposed a classification of energy intensity associated with storms, based in *Mendoza and Jimenez* (2011), with the following classes: Low, Moderate, Significant, Severe and Extreme. It appears that the coastal of Espinho belongs totally to the intensity class Severe, though with more intensity in the north compared to the south section classified. It is observed a strong correlation between the energy intensity and the storm duration and, to a lesser degree, between the (storm) energy intensity and maximum significant wave height.

Finally we discuss the results of energy intensities obtained from the definition of different limits the value of the significant wave height (3 m, 4 m and 5 m), obtaining different values of the total number of annual storms. Also, we discuss the differences between the results obtained with two other proposals for classification of the storms intensity, other than that defined by *Mendoza and Jimenez* (2011). The results suggest that increasing the intensity threshold for the higher classes one obtains a (desirable) decaying distribution of the number of storms from the Low to the Extreme classes. However, these findings need validation at other coastal zones.

Keywords: SWAN; Espinho; Wind generated waves; Storm Energy Content; Storm.



## LISTA DE ACRÓNIMOS E SIGLAS

AMP	- Área <b>M</b> etropolitana do <b>P</b> orto
HZ	- <b>H</b> ydrographic <b>Z</b> ero
IH	- Instituto <b>H</b> idrográfico
INE	- Instituto <b>N</b> acional de <b>E</b> statística
JONSWAP	- <b>J</b> oint <b>N</b> orth <b>S</b> ea <b>W</b> Ave <b>P</b> roject
SWAN	- <b>S</b> imulating <b>W</b> Aves <b>N</b> earshore
TPAR	- <b>T</b> ime <b>P</b> ARameters
UTM	- <b>U</b> niversal <b>T</b> ransverse <b>M</b> ercator
WW3	- <b>W</b> AVE <b>W</b> ATCH <b>III</b> ®
ZH	- <b>Z</b> ero <b>H</b> idrográfico



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	- amplitude de uma onda
$c$	- celeridade ou velocidade de fase
$C_g$	- celeridade de grupo
$E$	- energia da onda
$g$	- aceleração gravítica
$H$	- altura de onda
$H_b$	- altura de onda na rebentação
$H_s$	- altura de onda significativa
$h$	- profundidade
$h_b$	- profundidade na rebentação
$Ir$	- número de <i>Iribarren</i>
$k$	- número de onda
$K_s$	- coeficiente de empolamento
$L$	- comprimento da onda
$p(\eta)$	- distribuição da elevação da superfície do mar
$m_n$	- momento de ordem $n$ do espectro
$S(\omega)$	- densidade espectral de energia
$T$	- período de onda
$T_2$	- período médio de zero ascendente
$T_c$	- período médio entre picos
$Tm_{01}$	- período médio da onda
$T_p$	- período de pico
$\alpha$	- constante que relaciona a velocidade do vento com a distância do <i>fetch</i>
$\beta$	- declive do fundo
$\gamma$	- largura espectral para o espectro de <i>JONSWAP</i>
$\varepsilon$	- largura de banda espectral
$\eta$	- elevação da superfície livre
$\theta$	- ângulo de incidência da onda
$\lambda$	- comprimento de onda
$\rho$	- densidade do fluido
$\sigma$	- desvio padrão
$\omega_p$	- frequência de pico da onda





# ÍNDICE

1.	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
2.	<b>ENQUADRAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
2.1.	DEFINIÇÕES GERAIS.....	3
2.2.	INFLUÊNCIA DA AGITAÇÃO E DO NÍVEL DO MAR NA ZONA COSTEIRA .....	10
2.3.	INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO DO LITORAL NA ZONA COSTEIRA .....	13
3.	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
3.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	15
3.2.	CATEGORIZAÇÃO DAS TEMPESTADES .....	15
3.3.	MODELO SWAN .....	20
3.3.1.	DESCRIÇÃO DO MODELO .....	20
3.3.2.	ESTRUTURA DE CÁLCULO DO MODELO NUMÉRICO.....	23
3.3.3.	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO MODELO .....	29
4.	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>45</b>
4.1.	O LITORAL DE ESPINHO.....	45
4.2.	APLICAÇÃO DO MODELO SWAN AO CASO DE ESTUDO.....	47
4.2.1.	DOMINIO DE CALCULO E MALHAS .....	47
4.2.2.	BATIMETRIA E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA .....	48
4.2.3.	AGITAÇÃO MARÍTIMA .....	50
4.2.4.	CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES.....	52
4.3.	RESULTADOS DA INTENSIDADE ENERGÉTICA E CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES .....	53
4.4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	64
5.	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A – FICHEIRO TPAR (CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAN) .....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO B – OUTPUT DO SWAN EM FORMATO ASCII .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO C – SIMULAÇÃO HARIGVLIET ORIGINAL .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO D – TESTE Nº 1 EFECTUADO PARA O EIXO (X,11000) .....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO E – CÓDIGOS ‘TESTEBASE3.M’ E ‘TESTEBASE4.M’ UTILIZADOS NO MATLAB® .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO F – CÓDIGO ‘NAUT_CART.M’ UTILIZADO NO MATLAB® .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO G – SIMULAÇÃO PARA O PERÍODO DE 2003 ATÉ 2009 – FICHEIRO ‘OFF_2003_2009.SWN’ .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO H – CÓDIGO ‘INTENSIDADE.M’ UTILIZADO NO MATLAB® .....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO I – ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA MÁXIMA, PERÍODO DE PICO MÁXIMO E DIRECÇÃO DE CADA TEMPORAL, NAS LOCALIZAÇÃO Nº 1, Nº 13 E Nº 26, PARA O PERÍODO DE TEMPO TOTAL DE 56 ANOS .....</b>	<b>95</b>



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 - CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES (BASEADO EM <i>MENDOZA</i> E <i>JIMENEZ</i> , 2011).....	20
TABELA 3.2 - IMPORTÂNCIA NO SWAN DOS DIFERENTES PROCESSOS QUE AFECTAM A PROPAGAÇÃO DAS ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS, INTERMÉDIAS E POUCO PROFUNDAS ( <i>BATTJES</i> , 1994). ....	27
TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL DA SIMULAÇÃO.....	48
TABELA 4.2 - COORDENADAS E BATIMETRIA DAS 26 LOCALIZAÇÕES.....	50
TABELA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DAS TEMPESTADES OBSERVADAS PELAS CLASSES DEFINIDAS PARA O LIMAR 3 METROS.....	51
TABELA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPESTADES OBSERVADAS PELAS CLASSES DEFINIDAS PARA O LIMAR 4 METROS.....	51
TABELA 4.5 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPESTADES OBSERVADAS PELAS CLASSES DEFINIDAS PARA O LIMAR 5 METROS.....	51
TABELA 4.6 - VALORES MÁXIMOS DE INTENSIDADE ENERGÉTICA, DURAÇÃO DE TEMPESTADE, ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO – LOCALIZAÇÕES Nº1, Nº13 E Nº26.....	54
TABELA 4.7 - VALORES MÁXIMOS DE INTENSIDADE ENERGÉTICA, DURAÇÃO DE PERÍODO DE TEMPESTADE, ALTURA DE ONDA MÁXIMA E PERÍODO DE PICO MÁXIMO - LOCALIZAÇÕES Nº10 E Nº24. ....	58
TABELA 4.8 - LOCALIZAÇÕES, INTENSIDADE ENERGÉTICA MÉDIA, DISTRIBUIÇÃO DE TEMPESTADES POR CLASSES (EM %) E Nº DE TEMPESTADES POR ANO. ....	59
TABELA 4.9 - TRÊS CLASSIFICAÇÕES DE PERÍODOS DE TEMPESTADE. ....	65



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - PARÂMETROS BÁSICOS DE UMA ONDA DE SUPERFÍCIE (EXTRAÍDO DE SILVA, 2009) .....	3
FIGURA 2.2 - EXEMPLO DE UMA VAGA (FONTE: <i>COMET PROGRAM</i> ).....	4
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE ONDULAÇÃO (FONTE: <i>COMET PROGRAM</i> ).....	4
FIGURA 2.4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS ESPECTROS DE <i>JONSWAP</i> E <i>PIERSON-MOSKOWITZ</i> (FONTE: CEM).....	6
FIGURA 2.5 - DIFERENTES TIPOS DE PROFUNDIDADES DO MAR. ....	7
FIGURA 2.6 - FENÓMENO DE REFRAÇÃO (FONTE: <i>COMET PROGRAM</i> ) .....	9
FIGURA 2.7 - FENÓMENO DE DIFRAÇÃO NA BAÍA DE S. MARTINHO DO PORTO (FONTE: <i>GOOGLE EARTH</i> ) .....	10
FIGURA 2.8 - INVASÃO DO MAR (FONTE: <i>SKYSCRAPERCITY.COM</i> , 2010) .....	13
FIGURA 2.9 - OCUPAÇÃO EM FRENTE À PRAIA DE ESPINHO (FONTE: <i>SKYSCRAPERCITY.COM</i> , 2009) .....	13
FIGURA 3.1 - SUBIDA DO MAR EM PERÍODO DE TEMPESTADE (ESPINHO, 2010).....	15
FIGURA 3.2 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA RELATIVA (EM %) DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA (COSTA <i>ET AL.</i> , 2011).....	16
FIGURA 3.3 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA RELATIVA DO PERÍODO (COSTA <i>ET AL.</i> , 2011).....	16
FIGURA 3.4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA RELATIVA DA DIRECÇÃO DE ONDA (COSTA <i>ET AL.</i> , 2011). .	17
FIGURA 3.5 - VARIAÇÃO, AO LONGO DO ANO, DA DISTRIBUIÇÃO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA (COSTA <i>ET AL.</i> , 2011).....	17
FIGURA 3.6 - DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA DE ALTURA DE ONDA MÁXIMA (COSTA <i>ET AL.</i> , 2011).....	18
FIGURA 3.7 - DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA MÉDIA DA DIRECÇÃO E DURAÇÃO DE TEMPESTADES (COSTA <i>ET AL.</i> , 2011). ....	18
FIGURA 3.8 - DOMÍNIO DE CÁLCULO (XC, YC) EM RELAÇÃO AO SISTEMA LOCAL DE COORDENAS (XP, YP) (ADAPTADO DE <i>SWAN TEAM</i> , 2013) .....	25
FIGURA 3.9 - DEFINIÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS FRONTEIRAS DO DOMÍNIO DE CÁLCULO (ADAPTADO DE <i>GOOGLE EARTH</i> ).....	26
FIGURA 3.10 - ILUSTRAÇÃO DAS VÁRIAS MALHAS QUE PODEM SER USADAS NO <i>SWAN</i> .....	28
FIGURA 3.11 - DOMÍNIO DO TESTE <i>HARINGVLIET</i> E DEFINIÇÃO DOS PONTOS PARA SAÍDA DE RESULTADOS. ....	30
FIGURA 3.12 - GRÁFICO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA AS 15 HORAS, REFERENTE AOS 5 TESTES.....	32
FIGURA 3.13 - GRÁFICO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA AS 17 HORAS, REFERENTE AOS 5 TESTES.....	32
FIGURA 3.14 - GRÁFICO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA AS 19 HORAS, REFERENTE AOS 5 TESTES.....	33
FIGURA 3.15 - GRÁFICO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA AS 21 HORAS, REFERENTE AOS 5 TESTES.....	33
FIGURA 3.16 - GRÁFICO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA AS 23 HORAS, REFERENTE AOS 5 TESTES.....	34

FIGURA 3.17 - CONVENÇÃO DAS DIRECÇÕES DE ONDA.....	35
FIGURA 3.18 - DIRECÇÕES PROVENIENTES DO 1º QUADRANTE, NAS FRONTEIRAS <i>W</i> E <i>S</i> (FORÇAMENTO NA FRONTEIRA <i>W</i> ). .....	36
FIGURA 3.19 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA NO DOMÍNIO DE CÁLCULO PARA RUMOS PROVENIENTES DO 1º QUADRANTE (FORÇAMENTO NA FRONTEIRA <i>W</i> ). .....	37
FIGURA 3.20 - DIRECÇÕES PROVENIENTES DOS 2º E 3º QUADRANTES, NAS FRONTEIRAS <i>W</i> E <i>S</i> (FORÇAMENTO NA FRONTEIRA <i>W</i> ). .....	38
FIGURA 3.21 - DIRECÇÕES PROVENIENTES DO 4º QUADRANTE, NAS FRONTEIRAS <i>W</i> E <i>N</i> (FORÇAMENTO NA FRONTEIRA <i>W</i> ). .....	39
FIGURA 3.22 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA NO DOMÍNIO DE CÁLCULO PARA RUMOS PROVENIENTES DO 4º QUADRANTE (FORÇAMENTO NA FRONTEIRA <i>W</i> ). .....	39
FIGURA 3.23 - DIRECÇÕES PROVENIENTES DO 1º QUADRANTE, NAS FRONTEIRAS <i>W</i> E <i>S</i> (FORÇAMENTO NAS TRÊS FRONTEIRAS).....	40
FIGURA 3.24 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA NO DOMÍNIO DE CÁLCULO PARA RUMOS PROVENIENTES DO 1º QUADRANTE (FORÇAMENTO NAS TRÊS FRONTEIRAS). .....	40
FIGURA 3.25 - DIRECÇÕES PROVENIENTES DOS 2º E 3º QUADRANTES, NA FRONTEIRA <i>W</i> E NA ZONA COSTEIRA (FORÇAMENTO NAS TRÊS FRONTEIRAS).....	41
FIGURA 3.26 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA NO DOMÍNIO DE CÁLCULO PARA RUMOS PROVENIENTES DOS 2º E 3º QUADRANTES (FORÇAMENTO NAS TRÊS FRONTEIRAS).....	41
FIGURA 3.27 - DIRECÇÕES PROVENIENTES DO 4º QUADRANTE, NAS FRONTEIRAS <i>W</i> E <i>N</i> (FORÇAMENTO NAS TRÊS FRONTEIRAS).....	42
FIGURA 3.28 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA NO DOMÍNIO DE CÁLCULO PARA RUMOS PROVENIENTES DO 4º QUADRANTE (FORÇAMENTO NAS TRÊS FRONTEIRAS). .....	42
FIGURA 4.1 - LOCALIZAÇÃO DE ESPINHO E DOS ESPORÕES ADJACENTES À PRAIA DE ESPINHO (FONTE: <i>GOOGLE EARTH</i> ). .....	45
FIGURA 4.2 - EFEITOS DA EROÇÃO SOBRE A PRAIA ENTRE ESMORIZ E FURADOURO, ESPINHO 2009 (FONTE: <i>SKYSCRAPERCITY.COM</i> ).....	46
FIGURA 4.3 - DOMÍNIO DE CÁLCULO DO CASO DE ESTUDO. ....	47
FIGURA 4.4 - BATIMETRIA DO DOMÍNIO DE CÁLCULO. ....	49
FIGURA 4.5 - LINHA DA BATIMÉTRICA DOS 15 METROS AO LONGO DO LITORAL DE ESPINHO (ADAPTAÇÃO <i>GOOGLE EARTH</i> ). .....	50
FIGURA 4.6 - COMPARAÇÃO ENTRE OS TRÊS LIMITES DA PERCENTAGEM DE TEMPORAIS POR CLASSE....	52
FIGURA 4.7 - INTENSIDADE ENERGÉTICA MÉDIA AO LONGO DO LITORAL DE ESPINHO. ....	56
FIGURA 4.8 - INTENSIDADE ENERGÉTICA MÉDIA EM CADA LOCALIZAÇÃO. ....	57
FIGURA 4.9 - MÉDIA DO PERÍODO DE PICO MÁXIMO EM CADA LOCALIZAÇÃO. ....	57
FIGURA 4.10 - MÉDIA DE <i>HS_MÁX</i> E DE <i>HS_MÉD</i> EM CADA LOCALIZAÇÃO.....	57
FIGURA 4.11 - MÁXIMO, MÉDIA E MÍNIMO DAS DIRECÇÕES DE ONDA EM CADA LOCALIZAÇÃO. ....	58
FIGURA 4.12 - NÚMERO DE TEMPESTADES ANUAIS POR LOCALIZAÇÃO.....	60
FIGURA 4.13 - DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES POR DURAÇÃO DE TEMPESTADE (LOCALIZAÇÃO 13).....	60

FIGURA 4.14 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA MÁXIMA E DURAÇÃO DE PERÍODO DE TEMPESTADE POR CLASSE DE TEMPESTADE.....	61
FIGURA 4.15 - DURAÇÕES MÉDIAS E MÁXIMAS DE PERÍODOS DE TEMPESTADE EM CADA LOCALIZAÇÃO. .	62
FIGURA 4.16 - DISTRIBUIÇÃO DE $Hs\_MÁX$ POR INTENSIDADE ENERGÉTICA (LOCALIZAÇÃO 13).....	63
FIGURA 4.17 - DISTRIBUIÇÃO DE $Hs\_MÁX$ POR DURAÇÃO DE TEMPESTADE (LOCALIZAÇÃO 13).....	63
FIGURA 4.18 - DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE ENERGÉTICA POR DURAÇÃO DE TEMPESTADE (LOCALIZAÇÃO 13).....	64
FIGURA 4.19 - COMPARAÇÃO DE 3 CLASSIFICAÇÕES DE INTENSIDADE ENERGÉTICA (LOCALIZAÇÃO 13).	66
FIGURA I.1 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA MÁXIMA PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº1.....	95
FIGURA I.2 - PERÍODO DE PICO MÁXIMO PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº1.....	95
FIGURA I.3 - DIREÇÃO DE ONDA PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº1. ....	96
FIGURA I.4 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA MÁXIMA PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº13.....	96
FIGURA I.5 - PERÍODO DE PICO MÁXIMO PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº13.....	97
FIGURA I.6 - DIREÇÃO DE ONDA PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº13. ....	97
FIGURA I.7 - ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA MÁXIMA PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº26.....	98
FIGURA I.8 - PERÍODO DE PICO MÁXIMO PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº26.....	98
FIGURA I.9 - DIREÇÃO DE ONDA PARA O PERÍODO DE 56 ANOS, NA LOCALIZAÇÃO Nº26. ....	99





## 1. INTRODUÇÃO

Portugal tem uma forte ligação com o mar, sendo a sua costa, com uma extensão total de 863 km (INE, 2012), a fronteira para tal ligação. O litoral é extremamente rico e constitui recursos insubstituíveis e com as maiores potencialidades (Dias *et al.*, 1994). Alguns dos recursos que têm vindo a ser explorados são os que estão directamente relacionados com a segurança costeira, obras portuárias, sector de pescas, dinâmica e comportamento dos ecossistemas costeiros e o turismo. A sua importância faz com que a zona litoral tenha vindo a ser cada vez mais explorada e ocupada.

Com o aumento da ocupação do litoral da costa portuguesa, torna-se essencial conhecer quais os riscos associados à agitação marítima, visto que, principalmente a Norte do país, a costa é frequentemente fustigada por temporais. O litoral de Espinho, localizado na costa norte do continente português, é um exemplo de uma zona que sofre de problemas de erosão (Dias *et al.*, 1994). Nestes casos, opta-se muitas vezes pela construção de estruturas de protecção costeira, que nem sempre resistem à acção do mar e, como tal, de tempos a tempos são alvo de reparações ou mesmo de novas construções.

A fim de obter valores que permitam analisar o risco potencial de determinada zona costeira à acção de temporais, Mendoza *et al.* (2011) sugerem cálculo de um parâmetro, a intensidade energética de cada temporal, que dá informação da energia contida em cada temporal.

Assim, o principal objectivo da presente dissertação é conhecer a intensidade energética de um troço da costa continental portuguesa, no litoral de Espinho, de forma a analisar o risco potencial desta zona à acção da agitação marítima. Para tal, utilizou-se o modelo numérico SWAN, que permite, com base em dados de agitação medidos ao largo, estimar as características da agitação marítima e a respectiva intensidade energética numa zona mais próxima da costa.

A partir de dados hexa-horários de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção média do período de pico ( $D$ ) estimados para o período entre 1 de Janeiro de 1953 e 31 de Março de 2009, através do modelo WW3 (Dodet *et al.*, 2010), nas coordenadas 40° N; 10° W obtiveram-se os respectivos valores associados ao largo. Com recurso ao modelo SWAN, fez-se a propagação de cada uma das condições de agitação ao largo no período de estudo e obtiveram-se as condições de agitação marítima em vários pontos próximos da batimétrica dos 15 m, profundidade limite para o qual o fundo não é alterado pela agitação, numa zona em frente à costa de Espinho. Com base nos resultados das corridas do modelo SWAN nesses pontos, identificaram-se os períodos que correspondem a temporal e calcularam-se os valores da respectiva intensidade energética, de forma a analisar a sua possível relação com índices de susceptibilidade e vulnerabilidade da costa nesta zona.

Para a aplicação do modelo SWAN a este caso de estudo, foi necessário analisar a sensibilidade dos resultados do modelo a alguns parâmetros de entrada. Para tal foram realizados diversos testes que permitiram definir os procedimentos a utilizar para a entrada de dados no modelo.

A presente dissertação é assim constituída por este capítulo de Introdução, onde se descrevem os objectivos e a metodologia utilizados. Após a Introdução, segue-se o capítulo 2, onde são apresentados brevemente os conceitos de onda e espectro de onda, e os fenómenos que ocorrem durante a propagação de ondas (empolamento, refacção, rebentação, difracção e reflexão). No capítulo 2 são ainda abordados os temas da influência da agitação marítima e do nível do mar na zona costeira e da influência da ocupação do litoral na zona costeira. O capítulo 3 aborda o conceito de tempestade e o cálculo da intensidade energética durante períodos de tempestade. O modelo SWAN é apresentado neste terceiro capítulo, onde se inclui uma breve descrição da estrutura e funcionamento do modelo e apresentam-se os testes de sensibilidade realizados. No capítulo 4 é feito um enquadramento da zona de estudo, ao largo da costa de Espinho, descrevem-se as condições de aplicação do modelo SWAN (domínio, condições de fronteira e características de cada corrida efectuada) e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos no que se refere à intensidade energética na batimétrica próxima dos 15 metros. O capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas neste estudo.

## 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1. DEFINIÇÕES GERAIS

No oceano, é possível encontrar ondas de diferentes tamanhos e direções, compondo um padrão bastante complexo e em constante alteração. Admitindo o caso mais simples de uma onda sinusoidal (Figura 2.1) e identificando as suas características principais, temos que:

- ∴ o comprimento de onda,  $\lambda$  (m), é a distância horizontal entre duas cristas sucessivas ou duas cavas sucessivas.
- ∴ o período de uma onda  $T$  (s), é o intervalo de tempo entre a passagem de duas cristas sucessivas por um determinado ponto.
- ∴ a amplitude de uma onda,  $a$  (m), é o valor máximo de deslocamento vertical, em relação ao nível médio do mar.
- ∴ a altura de uma onda,  $H$  (m), é a diferença do deslocamento vertical, entre uma crista e uma cava adjacente.

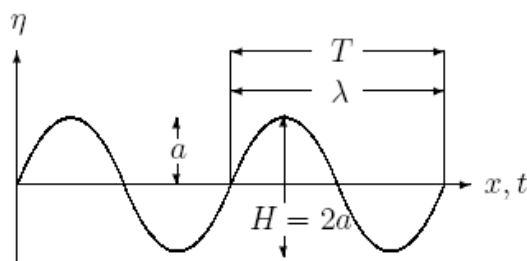


Figura 2.1 - Parâmetros básicos de uma onda de superfície (extraído de Silva, 2009)

Analisando as características de uma onda desde a sua geração, pode-se verificar que esta sofre bastantes alterações ao longo do tempo e do espaço, por transferência de energia do vento para a superfície do mar, interações não lineares entre ondas de diferentes frequências, entre outros fenómenos. Este ciclo inicia-se pela acção do vento que interage com a superfície do oceano. Desta interação surge uma onda que começa a desenvolver-se e a propagar-se, e a crescer em amplitude e comprimento, consoante o vento vai transferindo mais energia para a superfície do oceano. Esta onda poderá propagar-se para longe da área onde ocorreu o forçamento inicial, sem grande perda de energia, até chegar a um limite do oceano, isto é, até atingir uma costa.

Tendo em conta a sua distância à zona de geração da onda, esta pode dividir-se em dois grupos – vaga e ondulação:

- ∴ a vaga representa ondas de período curto, que se encontram na área onde foram geradas ou perto do seu local de geração. Tem aspecto irregular e declive elevado, apresentando não haver uma direcção de propagação comum a todas as ondas, ver Figura 2.2.

- ∴ a ondulação é caracterizada por ter um período maior que a vaga (normalmente superior a 10 segundos), apresenta uma forma mais regular, com cristas de baixo declive e direcção bem definida. Este tipo de ondas encontra-se longe do local de geração, ver Figura 2.3.



Figura 2.2 - Exemplo de uma vaga (Fonte: *COMET Program*)



Figura 2.3 - Exemplo de ondulação (Fonte: *COMET Program*)

A propagação de um sistema de ondas pode ser representada pelo somatório de um grande número de componentes de onda. Estas componentes são consideradas processos aleatórios e estatisticamente independentes. Considera-se então que a elevação da superfície do mar é um processo gaussiano. A sua distribuição da elevação,  $p(\eta)$ , é dada por:

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi E}} \times \exp\left(\frac{-\eta^2}{2E}\right) \quad (2.1)$$

onde  $\eta$  é a elevação da superfície livre e  $E$  é a energia. A partir do espectro da variância é possível retirar o parâmetro  $E$  necessário para a sua caracterização. Este parâmetro corresponde ao momento de ordem 0, que será visto em seguida.

A frequência de pico,  $\omega_p$ , é aquela para a qual se verifica o valor máximo do espectro e permite calcular o período de pico:

$$Tp = \frac{2\pi}{\omega p} \quad (2.2)$$

É possível definir espectro de uma onda, como a distribuição de energia da onda em por frequência. O cálculo de outros parâmetros que podem caracterizar o estado do mar é feito partindo do conceito de momento de ordem  $n$  do espectro:

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega \quad (2.3)$$

Assim, temos (USACE, 2006):

$$\therefore H_s = 4\sqrt{m_0} \quad \text{- Altura de onda significativa} \quad (2.4)$$

$$\therefore T_{m_{01}} = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad \text{- Período médio} \quad (2.5)$$

$$\therefore T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad \text{- Período médio de zero ascendente} \quad (2.6)$$

$$\therefore T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad \text{- Período médio entre picos} \quad (2.7)$$

Pode ainda calcular-se outro parâmetro que permite classificar a irregularidade do estado do mar, a largura de banda,  $\varepsilon$ , dada pela fórmula:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{T_2}{T_e}\right)^2} \quad (2.8)$$

Este valor tem de estar compreendido entre 0 e 1, sendo que o limite inferior corresponde a estados do mar regulares (de banda estreita) e o limite superior diz respeito a ondas muito irregulares (espectro de banda larga). Geralmente considera-se que um espectro é de banda estreita quando  $\varepsilon < 0.6$ .

A partir da análise dos registos das ondas, foram desenvolvidos vários espectros teóricos que procuram representar o espectro real da onda, sendo de destacar os de *Pierson-Moskowitz* e *JONSWAP* (ver Figura 2.4). Apenas se irá descrever o segundo, pois será este o utilizado no caso de estudo.

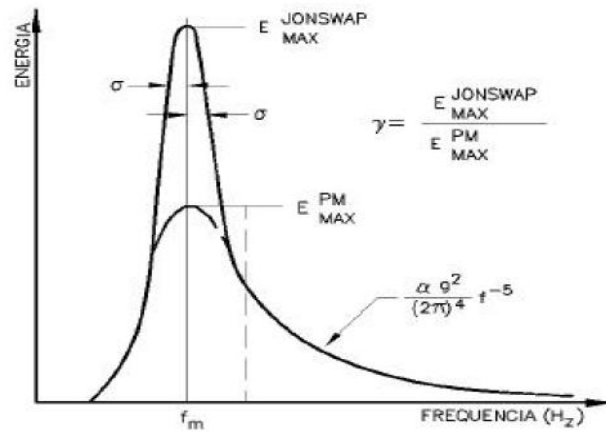


Figura 2.4 - Comparação entre os espectros de *JONSWAP* e *Pierson-Moskowitz* (Fonte: CEM)

O espectro,  $S(\omega)$ , de *JONSWAP* foi desenvolvido tendo como base o estudo de dados de onda registados no Mar do Norte. O espectro é dado por:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[ -1.25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \times \gamma \exp \left[ \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega_0^2} \right] \quad (2.9)$$

onde:

- $\gamma$  – Parâmetro de pico;
- $\alpha = 0.0081$
- $\sigma^2$  – Parâmetro de forma.

O parâmetro  $\omega_0$  é calculado sabendo o comprimento da zona ao longo da qual o vento se faz sentir na zona de geração, denominado por *fetch*. De notar que o espectro de *JONSWAP* iguala-se ao de *Pierson-Moskowitz* para valores de  $\gamma = 1$ , tornando-se este último um caso particular do espectro de *JONSWAP*.

É importante definir também a diferença entre as características das ondas em águas profundas e águas pouco profundas. Os limites de transição para as diferentes profundidades (ver Figura 2.5), podem ser calculados com base na profundidade da água,  $h$  e no comprimento da onda,  $L$ .

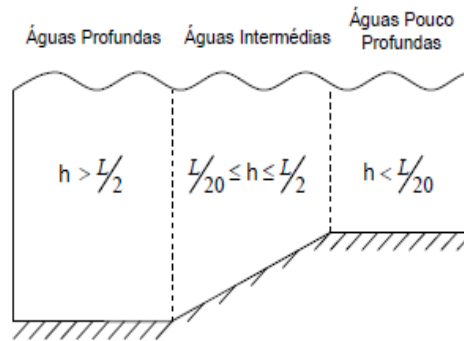


Figura 2.5 - Diferentes tipos de profundidades do mar.

Quando as ondas atingem zonas de águas pouco profundas, a sua forma muda, a velocidade diminui e as cristas modificam a sua inclinação. Quando o período da onda,  $T$ , se mantém constante mas a profundidade,  $h$ , diminui, a velocidade,  $c$ , e o comprimento da onda,  $\lambda$  vão também diminuir. Esta relação resulta da equação de dispersão, dada por:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.10)$$

onde:

- $k=2\pi/L$  – número de onda; (2.11)
- $h$  – profundidade da água;
- $g$  – aceleração gravítica.

Em águas profundas, as ondas propagam-se com maior celeridade que em águas pouco profundas, o mesmo acontecendo com as ondas de maior comprimento de onda ou período.

No caso real, a agitação não é formada por ondas sinusoidais mas por um conjunto de ondas com diferentes alturas, períodos e direcções. Assim, a caracterização do clima de agitação marítima passa por identificar as distribuições dos parâmetros da onda (a altura de onda significativa, o período de pico e a direcção), assim como os seus valores máximos e médios das ondas. Para a caracterização do clima de ondas é necessária informação de dados de agitação, reais ou simulados, durante um período de tempo bastante longo.

A partir da análise destes parâmetros, é possível determinar as suas distribuições para diferentes alturas do ano. Assim, é possível calcular:

- ∴ a distribuição da altura de onda significativa, período de pico e direcção das ondas, para meses de inverno ou verão;
- ∴ a identificação de períodos de tempestade ou de acalmia;
- ∴ a probabilidade de ocorrência de situações extremas de agitação marítima;
- ∴ a variação das direcções das ondas, consoante os meses analisados;

O conhecimento do clima de ondas de uma determinada zona é de grande importância para, assim, maximizar toda a sua protecção, nomeadamente para projectar e dimensionar estruturas de protecção e instalações costeiras. A caracterização deste clima constitui, na costa de Portugal, um primeiro passo para estudar formas de protecção costeira eficazes e diminuir os riscos.

Na propagação das ondas desde a zona de geração até ao local onde se dá a dissipação da sua energia (normalmente em zonas costeiras de pequenas profundidades), a variação de profundidade e outros factores ambientais afectam, em vários aspectos, as características das ondas, devido à ocorrência de vários fenómenos, dos quais se destacam: empolamento, refração, difracção, interacção entre as correntes e as ondas e rebentação.

O empolamento caracteriza-se pela diminuição do comprimento das ondas em função da profundidade, mantendo-se constante a energia entre dois raios de onda (ortogonais ou perpendiculares às cristas) consecutivos durante a sua propagação. Assim, assumindo que não existe dissipação de energia nem reflexão na propagação da onda e que esta se propaga com direcção constante entre o ponto 0 e 1, quando o comprimento de onda diminui, a altura da onda aumenta para que a quantidade de energia transportada seja a mesma numa área mais pequena. Sabendo que existe igualdade do fluxo de energia entre duas frentes de onda (Pereira, 2008), tem-se:

$$(E_a C_g)_0 = (E_b C_g)_1 \equiv \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 C_g\right)_0 = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 C_g\right)_1 \quad (2.12)$$

Da equação (2.12), resulta:

$$H_0^2 C_{g0} = H_1^2 C_{g1} \Rightarrow H_1 = H_0 \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_{g1}}} \Rightarrow H_1 = H_0 K_s \quad (2.13)$$

onde  $K_s$  é o coeficiente de empolamento e  $C_g$  a celeridade de grupo.

O fenómeno de refração verifica-se quando a onda se propaga de águas profundas para zonas de menor profundidade, com incidência oblíqua (ver Figura 2.6). Este facto acontece porque, à medida que as ondas se vão aproximando de zonas com profundidades mais baixas, as partes da crista destas ondas que se propagam em menores profundidades deslocam-se mais lentamente que as partes em maiores profundidade, o que faz com que a crista tenda a adaptar-se à morfologia do fundo.

Admitindo que não existe reflexão da onda, nem dissipação de energia e que as batimétricas são paralelas, este processo obedece à Lei de *Snell*:

$$\frac{\sin \theta}{c} = \frac{\sin \theta_0}{c_0} \quad (2.14)$$



onde  $c$  e  $c_0$  correspondem às velocidades em águas pouco profundas e em águas profundas, respectivamente. O ângulo de incidência da onda,  $\theta$ , corresponde ao ângulo que a crista da onda faz com as batimétricas.

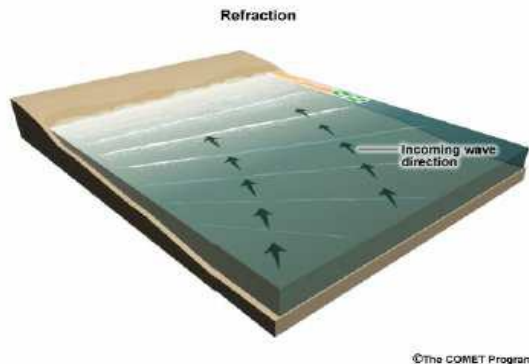


Figura 2.6 - Fenómeno de refração (Fonte: COMET Program)

À medida que a onda se vai aproximando de zonas menos profundas e de forma a que se mantenha o fluxo de energia, a diminuição da velocidade de grupo implica um aumento de altura de onda até atingir uma declividade  $(H/\lambda_0)$  limite. Este valor máximo representa o critério de rebentação de ondas. McCowan (1894) sugeriu que ocorre rebentação quando a sua altura,  $H_b$ , é igual a:

$$H_b = k h_b, \quad (2.15)$$

com  $k=0.78$  e  $h_b$  é a profundidade na rebentação.

A rebentação das ondas pode dar-se de diferentes formas e o número de Iribarren,  $I_r$ , permite classificar o tipo de rebentação das ondas em:

- $\therefore$  *Spilling* – rebentação progressiva;
- $\therefore$  *Plunging* – rebentação mergulhante;
- $\therefore$  *Surging* – rebentação de fundo.

onde  $I_r = \frac{\tan \beta}{(H/\lambda)^{1/2}} \quad (2.16)$

e  $\beta$  representa o declive do fundo.

O fenómeno da difracção (Figura 2.7) acontece, normalmente, quando as ondas encontram um obstáculo (quebra-mares, ilhas, etc.) e, por isso ocorre uma distribuição espacial não uniforme da altura de onda. O principal efeito da difracção consiste num transporte de energia ao longo das cristas, no sentido das zonas em que a altura de onda é menor, denominada por área de sombra.

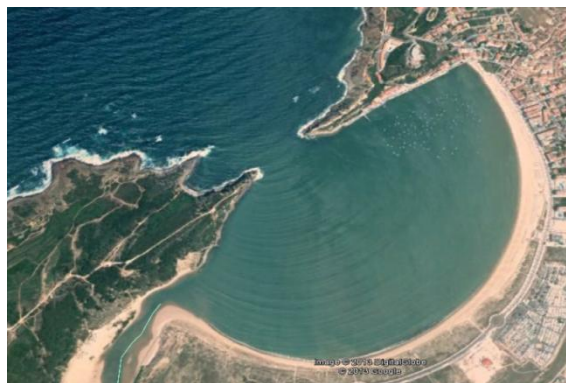


Figura 2.7 - Fenómeno de difracção na baía de S. Martinho do Porto (Fonte: *Google Earth*)

Quando a onda atinge um obstáculo, esta é deflectida, alterando a sua direcção. Se as ondas incidirem obliquamente sobre uma superfície reflectora, a onda reflectida terá igual ângulo que a incidente, mas direcção contrária. Este fenómeno depende das características físicas e da geometria do obstáculo e da onda.

## 2.2. INFLUÊNCIA DA AGITAÇÃO E DO NÍVEL DO MAR NA ZONA COSTEIRA

Os fenómenos associados ao mar, principalmente as ondas e as alterações do nível médio do mar, podem modificar fortemente o litoral, levando a que a faixa costeira seja muito dinâmica, com constantes mutações em todo o seu comprimento. Por exemplo, a elevação do nível do mar ao longo dos séculos, embora gradual, pode implicar que toda a faixa costeira se vá adaptando lentamente a essa mudança, de forma a atingir o equilíbrio dinâmico entre mar e costa. Por outro lado, de uma forma muito menos lenta que a anterior, o litoral altera-se devido à ocorrência de temporais. A agitação marítima, especialmente os temporais pode levar, assim, a alterações na costa.

No que se refere à **agitação marítima**, a costa ocidental portuguesa está completamente exposta à agitação gerada no Atlântico Norte, sendo caracterizada por ondas de baixa frequência e de elevada altura significativa. Existem três tipos de condições de agitação marítima caracterizados, principalmente, pela sua direcção de incidência (Silva, 2009):

- ∴ Direcções de incidência de Noroeste e Oeste, que representam a maioria das observações realizadas. Estas situações são impostas pela presença do Anticiclone dos Açores e pela presença de uma depressão estacionária a Norte da Península Ibérica. Este tipo de agitação é responsável pela maioria dos eventos extremos observados, sendo caracterizada por frequências mais baixas e alturas mais elevadas, representativas de situações de vaga (*swell*).
- ∴ Direcção de incidência de Norte: ocorre principalmente no período de verão, caracterizada por ondas de frequência elevada e altura mais reduzida. Esta condição ocorre normalmente pelo deslocamento do Anticiclone dos Açores para Este e, também, pela presença de uma depressão no centro da Península Ibérica.

∴ Direcção de incidência de Sudoeste, normalmente ocorrem no Inverno, associadas a aproximações de superfícies frontais frias e/ou depressões quase estacionárias localizadas a Sudoeste da Península Ibérica. Caracterizam-se por ondas de período intermédio, mas que atingem alturas elevadas com grande frequência.

De notar que, existe uma sazonalidade nos valores de altura de onda significativa observados, sendo estes mais elevados nos meses de Inverno. Considera-se que ocorre temporal quando a altura de onda significativa supera um determinado valor pré-definido.

A densidade de energia contida em cada temporal, denominada **intensidade energética**, pode ser definida por:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad (2.17)$$

onde  $t_1$  e  $t_2$  são o intervalo de tempo em que a tempestade ocorre e  $H_s$  a altura de onda significativa. O uso de apenas um valor de altura de onda significativa para caracterizar a tempestade, pode resultar numa subestimação ou sobrestimação do valor da intensidade energética (Mendoza, *et al.*, 2011).

O conceito de *fetch* está directamente relacionado com a variação de altura de onda. Por *fetch* entende-se a distância onde se faz sentir o efeito do vento que está a gerar a onda: quanto maior for essa distância, maior será o tempo durante a qual a energia é transmitida pelo vento e, consequentemente, maior altura desenvolvem. Com um *fetch* da ordem dos milhares de quilómetros, a energia transmitida pelas grandes tempestades originadas no oceano é transmitida sob a forma de agitação marítima e acaba naturalmente por se dissipar junto à costa portuguesa, através da rebentação de ondas. A costa é também, com extrema frequência, atingida pela passagem de baixas pressões (elevação do ar quente para a atmosfera) e superfícies frontais (linha de contacto entre duas massas de ar contíguas, que diferem na temperatura e na humidade) originando, deste modo, ondas de curto período que, por vezes, também se tornam violentas. Assim, em resultado da agitação que atinge a costa, a erosão costeira atinge, em algumas zonas, uma forte amplitude, verificando-se grandes recuos da linha de costa em algumas zonas.

O regime da agitação marítima em Portugal tem vindo a ser estudado e existem vários trabalhos sobre o assunto, de que são exemplo os de: Carvalho & Barceló (1966), Pires & Pesanha (1984; 1986), Capitão (1992) e Mendes (1992). Estes indicam claramente que, a violência dos temporais na costa ocidental de Portugal continental é maior a Norte do que a Sul. Assim, o litoral de Espinho, incluído na costa Norte, é dos troços mais violentamente atingidos pelos temporais.

Associado aos factores meteorológicos e, consequentemente, a temporais, surge o conceito de **storm surge**, isto é, de sobrelevações do nível do mar devidas a baixas pressões e ventos intensos. Efectivamente, quando ocorre ligado a temporais e períodos de marés vivas, os

riscos de recuo acelerado da linha de costa, de inundações em zonas ribeirinhas e destruição de bens são potenciados. O primeiro trabalho relativo a este fenómeno existente no nosso país e baseado em dados reais é o estudo de Moraes & Abecassis (1978), que estimou uma sobrelevação máxima de 0,53 metros, durante o temporal de 1973, para a zona do Porto de Leixões (sensivelmente a 20 quilómetros de Espinho). No entanto, a primeira análise sistemática do fenómeno em Portugal, abrangendo a análise dos registos maregráficos de várias estações no litoral do país (p. ex. Viana do castelo, Leixões, Aveiro, etc.), foi feita por Taborda e Dias (1992). Este trabalho refere-se à análise das sobrelevações ocorridas em dois temporais significativos – Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981 - que provocaram avultados danos na linha de costa portuguesa. No decurso do primeiro, foram registados valores de altura de onda significativa (*H<sub>s</sub>*) na ordem dos 8 metros (Capitão, 1992), correspondendo a uma altura máxima de mais de 12 metros. Os valores máximos da sobrelevação no temporal de 1978, medidos nas estações de Cascais e Viana do Castelo, foram de 40 centímetros e 90 centímetros, respectivamente. Todavia, o segundo temporal diferenciou-se do primeiro pelos valores da sobrelevação terem sido registados num único dia e não ao longo de 5 dias e, também, nos valores de *H<sub>s</sub>*, que foram de 9,3 metros com uma altura máxima de 14,3 metros (Capitão, 1992). Ambos os temporais assemelharam-se nas condições meteorológicas, com consecutivas passagens de ondulações frontais, ventos fortes vindo de *W-SW* e terem coincidido em altura de marés vivas. Estes resultados revelam que, contrariamente ao que era aceite até esse momento, podem ocorrer episódios de **storm surge** em Portugal com amplitudes bastante significativas.

A **subida do nível médio do mar**, que se faz sentir durante prazos temporais alargados, tem impactos relativos aparentemente reduzidos em litorais arenosos e rochosos, mas que podem ser maiores noutras zonas costeiras. No caso do litoral de Espinho, por exemplo, por estar cercado a norte por afloramentos rochosos e a sul por extensas praias, esta não é considerada uma causa a ter em grande conta. Porém, a elevação do mar nestas zonas costeiras poderá ter um efeito mais agravante em zonas ribeirinhas, nomeadamente na zona em frente à cidade de Espinho, provocando, por exemplo inundações frequentes (Figura 2.8). É importante referir que a subida secular do mar tem (e terá no futuro) outras consequências, devidas à actual *Modificação Climática Global*, geralmente designada por *Global Change*. É previsível que as alterações climáticas venham a trazer modificações no clima de agitação marítima com efeitos na faixa litoral (Santos *et al.*, 2006).



Figura 2.8 - Invasão do mar (Fonte: *skyscrapercity.com*, 2010)

### 2.3. INFLUÊNCIA DA OCUPAÇÃO DO LITORAL NA ZONA COSTEIRA

A ocupação do litoral, uma zona já de si frágil, tem tido em muitos casos uma consequência negativa no seu equilíbrio. A forte degradação das estruturas naturais, devido a essa ocupação, tem vindo a debilitar o litoral. Um exemplo desta ocupação é o caso da construção, no início do século passado, dos molhes do porto de Leixões e do molhe da barra do Douro, que levou a que o litoral de Espinho sofresse uma diminuição do volume global de areias que chegavam do norte. A costa de Espinho sempre foi a zona onde ocorreram as maiores destruições devidas à força do mar, o que teve grande impacto nas primeiras construções da linha costeira, onde foram ensaiadas as primeiras estruturas modernas de protecção costeira do nosso país (defesas frontais e esporões) (Figura 2.9). Assim, foram estes os principais motivos da artificialização total de todo o litoral de Espinho (Dias *et al.*, 1994).



Figura 2.9 - Ocupação em frente à praia de Espinho (fonte: *skyscrapercity.com*, 2009)

Além dessa ocupação do litoral, também algumas intervenções do homem, ao nível da construção de barragens e portos, de dragagens, etc., têm contribuído para esta modificação, ao modificar o transporte de sedimentos à costa. Estes fenómenos têm sido os principais factores da alteração da zona costeira, modificando as características da dinâmica hidrosedimentar e

conduzindo a alterações do seu equilíbrio dinâmico. Como resultado, verifica-se em alguns trechos uma acentuada erosão costeira e o recuo da linha de costa.

Resumidamente, as principais causas de erosão costeira são devidas às deficiências do abastecimento sedimentar quer naturais, quer induzidas directa ou indirectamente por variadas actividades relativas à acção humana e, presumivelmente, pelas próprias obras de protecção costeira. A erosão costeira está, assim, inserida na categoria de riscos naturais devido a factores naturais e, também, por intervenção humana no litoral.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Descreve-se neste capítulo a metodologia utilizada para obter informação sobre a intensidade energética dos temporais no litoral de Espinho. Assim, no ponto 3.2 descreve-se o que se entende por tempestade, como se categoriza as tempestades e como se calcula a intensidade energética de cada tempestade, com base em dados espaçados de 6 em 6 horas de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direcção média do período de pico ( $D$ ) próximos da costa em frente a Espinho.

Neste trabalho, os dados utilizados para o cálculo da intensidade energética correspondem a condições de agitação em pontos próximos da batimétrica dos 15 m numa zona em frente à costa de Espinho. Para simular esses registos, utilizou-se o modelo numérico SWAN, que permite propagar dados registados no período entre 1 de janeiro de 1953 e 31 de março de 2009 ao largo da Figueira da Foz até à zona de estudo. Assim, no ponto 3.3 descreve-se o modelo SWAN e os testes efectuados de análise de sensibilidade do modelo a alguns parâmetros de entrada.

#### 3.2. CATEGORIZAÇÃO DAS TEMPESTADES

Como já referido, a acção de temporais pode ser um factor de risco potencial numa determinada zona costeira (Figura 3.1). A definição do que se considera como temporal varia de ponto para ponto do globo, mas é normalmente definida por um valor limite de altura de onda significativa. Na costa oeste continental portuguesa, a identificação de períodos de tempestade é considerada para valores de altura de onda significativa ( $H_s$ ) superiores a 5 metros (<http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php>, 2013), enquanto a costa Sul, para períodos de temporal, toma valores de  $H_s$  superiores a 3,0 metros.



Figura 3.1 - Subida do mar em período de tempestade (Espinho, 2010).

Costa *et al.* (2011) consideram condições de tempestade para a costa oeste de Portugal, quando a altura significativa de onda (definida como altura calculada pelo momento de ordem zero, eq. 2.4),  $HM_0$ , supera 4,5 metros (valor inferior indicado pelo Instituto Hidrográfico, para a costa Oeste). Através da informação obtida a partir do processamento dos dados recolhidos da estação ondógrafo da Figueira da Foz entre 1990 e 1996, Costa *et al.* (2011) efectuaram um estudo estatístico do clima de agitação marítimo associado à estação da Figueira da Foz.

Foi possível observar, através de gráficos das distribuições de frequência relativa (Figura 3.2), para a altura de onda significativa:

- ∴ valores inferiores a 1 m (10%);
- ∴ valores mais frequentes situam-se entre 1 e 2 metros (40%);
- ∴ valores superiores a 3 metros (22%);
- ∴ a média dos valores observados é de 2,2 metros.

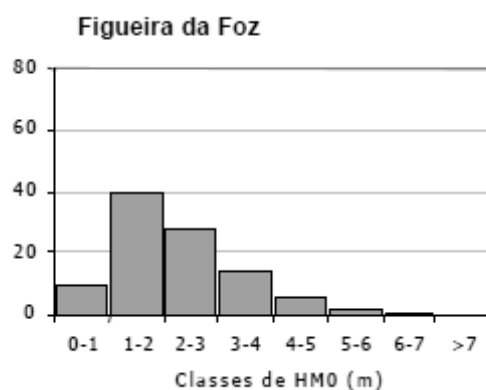


Figura 3.2 - Distribuição de frequência relativa (em %) de altura de onda significativa (Costa *et al.*, 2011).

Relativamente ao período de pico (Figura 3.3) observou-se que, os valores mais frequentes estão entre os 9 e os 13 segundos (60%) e valores superiores a 15 segundos não chegam aos 10%. A média total dos valores observados é de 11,4 segundos.

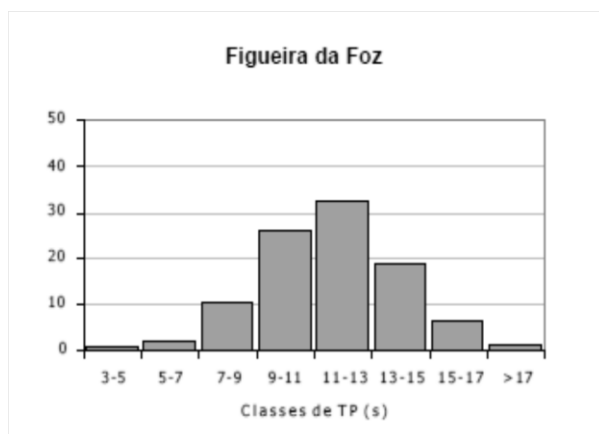


Figura 3.3 - Distribuição de frequência relativa do período (Costa *et al.*, 2011).



Quanto à direcção média, a maior parte das observações são do sector *NW* e *W* (90%), enquanto as observações vindas de *SW* não passam de 3% (Figura 3.4).

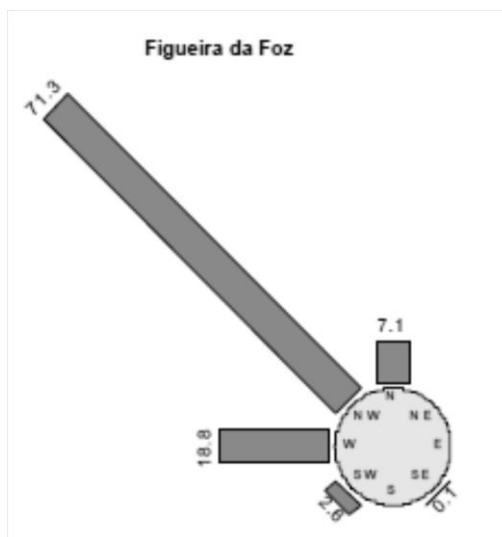


Figura 3.4 - Distribuição de frequência relativa da direcção de onda (Costa *et al.*, 2011).

A Figura 3.5 ilustra a variação ao longo do ano da distribuição de frequência relativa da altura de onda significativa. Este tipo de gráfico realça a sazonalidade evidente para a costa Oeste, realçando a severidade do estado do mar associado a esta zona. Valores superiores a 5 metros ocorrem essencialmente nos meses de Inverno (7% em Janeiro), por outro lado, valores de *Hs* inferiores a 3 metros é, em todos os meses, superior a 60%.

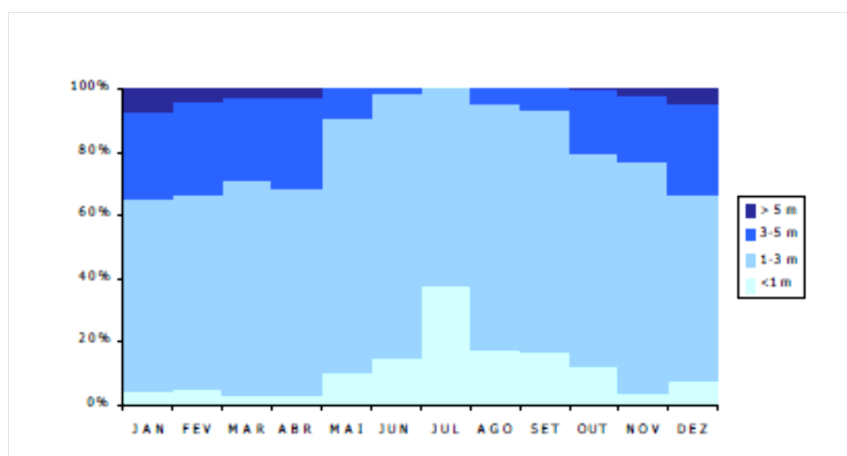


Figura 3.5 - Variação, ao longo do ano, da distribuição de altura de onda significativa (Costa *et al.*, 2011).

O número médio de dias com temporal observado no Verão e no Inverno, para a estação da Figueira da Foz, foi de 3,4 e 19,9, respectivamente. O total de registos de temporal, para o período do estudo, foi de 56 temporais. De salientar, uma vez mais que, os meses de Inverno são mais susceptíveis a temporais.

A partir de um sistema de classificação objectiva dos regimes de circulação atmosférica proposta por Trigo (1996), descreveram-se os períodos de tempestade em 10 tipos. Relativamente ao  $H_s$  (Figura 3.6), o tipo dominante é de *NW* que retém cerca de 58% dos temporais observados, Oeste com uma menor contribuição (13%), ficando os restantes 29% pelos padrões N, SW, SE e E. Para *NW*, observaram-se valores de altura de onda máxima entre os 5 e 7 metros (45%), porém valores de altura de onda máximos superiores a 7 metros também foram atingidos (16%).

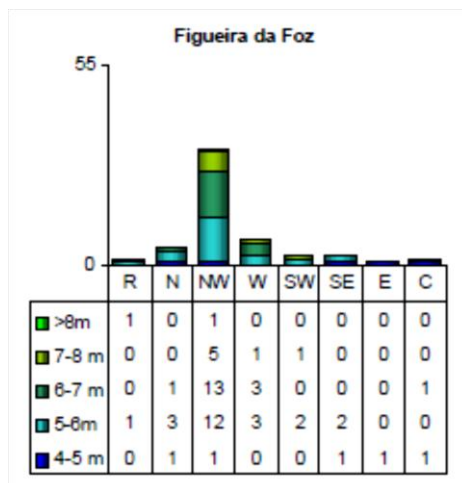


Figura 3.6 - Distribuição conjunta de altura de onda máxima (Costa *et al.*, 2011).

Por último, Costa *et al.* (2011), diz que a duração dos temporais na costa Oeste persiste por menos de 2 dias (75% das observações), sendo que, relacionando com os padrões propostos por Trigo (1996), tempestades com durações superiores a 2 dias, ocorrem para direcções associadas ao tipo de *NW*, enquanto durações superiores a 5 dias, só para o caso de *NW* (Figura 3.7).

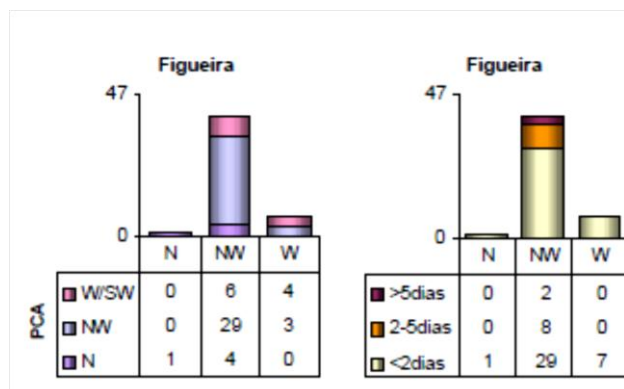


Figura 3.7 - Distribuição conjunta média da direcção e duração de tempestades (Costa *et al.*, 2011).

O trabalho elaborado por Costa *et al.* (2011) refere que o período de tempo de cobertura dos dados observados é muito curto para que se possa garantir uma máxima credibilidade ao estudo.

O trabalho de *Mendoza e Jimenez* (2006) uma vez que foi realizado para o Mar das Baleares (costa Este de Espanha), admite para períodos de tempestade, valores de altura de onda significativa superiores a 2,0 metros (valor de referência admitido pela Autoridade Portuária Espanhola). É a partir destes valores, que admite-se existir condições mínimas necessárias para que haja um impacto significativo em toda a costa, relativamente aos fenómenos de erosão costeira e inundações. O trabalho de *Mendoza e Jimenez* (2006) refere também, como requisito para se considerar como tempestade, um tempo mínimo de persistência desse estado de mar (no caso da costa espanhola 6 horas). *Mendoza et al.* (2006) adicionaram à condição anterior, um outro critério para identificar tempestades estatisticamente independentes, que corresponde a considerar como uma única tempestade com dois picos a que ocorra quando dois episódios extremos se dão com um intervalo máximo entre eles de 72 horas e um intervalo com altura significativa inferior a dado valor (no caso de estudo, 1,5 m) inferior a 6h.

Quando se analisam séries temporais de agitação, sejam elas provenientes de dados de campo ou resultados de modelos numéricos, é possível definir o início e fim de um temporal, a sua duração e a energia contida neste temporal, anteriormente definida como **intensidade energética** (eq. 2.17).

Para definir um período de tempestade na costa oeste de Portugal, neste trabalho utilizam-se os resultados das simulações do modelo SWAN, que efectua a propagação de dados ao largo até uma zona junto à batimétrica aproximada dos -15 m (ZH). Apesar do valor de referência de  $H_s$  admitido para a costa Oeste, ser de 5,0 metros, nesta dissertação optou-se por um valor menor. Esta opção foi tomada com vista a abranger mais períodos de tempestade (intensidade energética e duração) e, também, poder utilizar a classificação resultante do tratamento dos dados na costa Sul de Portugal.

Assim, quando a altura de onda significativa toma valores superiores a 3 metros considera-se que se está na presença de uma tempestade. Após verificados os períodos de tempo em que  $H_s > 3\text{ m}$ , definem-se os intervalos de tempo referentes ao início,  $t_{inicial}$  e ao fim,  $t_{final}$  de cada tempestade e calcula-se a sua energia através da equação 3.1, com os valores de  $t_1=t_{inicial}$  e  $t_2=t_{final}$ .

No trabalho de *Mendoza, et al.* (2011), os períodos de tempestade foram categorizadas em 5 grupos, que variam entre tempestades fracas a extremas e que se diferenciam nos valores máximos médios de altura de onda significativa,  $H_s$ , período de pico,  $T_p$ , duração da tempestade e intensidade energética. Neste estudo consideraram-se as mesmas 5 classes (Fracas, Moderada, Significativa, Severa e Extrema). Através da Tabela 3.1, é possível observar as classes utilizadas neste trabalho e os intervalos que as caracterizam.

Tabela 3.1 - Classificação de tempestades (baseado em *Mendoza e Jimenez, 2011*).

Classes	E (m <sup>2</sup> h)
Fraca	$E \leq 250$
Moderada	$250 < E \leq 500$
Significativa	$500 < E \leq 700$
Severa	$700 < E \leq 1200$
Extrema	$E > 1200$

Para o caso de estudo definiu-se qual o período mínimo de tempestade e qual o intervalo máximo entre picos de tempestades. Para definir uma tempestade, admitiu-se que esta teria de ter, durante um mínimo de 6 horas, valores de  $H_s$  superiores a 3,0 metros. Para além disso, considerou-se a mesma tempestade quando dois períodos de tempestade não se distanciavam entre si no máximo 48 horas. Estes dois critérios foram os estipulados para definir períodos de temporal no caso de estudo.

### 3.3. MODELO SWAN

#### 3.3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO

O conhecimento das condições do mar ao longo da costa é muito importante para o planeamento das actividades marítimas. Esta relevância deve-se à aproximação de navios a portos, à actividade associada às embarcações de pesca e recreio e, também, a iniciativas socioeconómicas que se desenvolvem no litoral.

No passado, as medições dadas pelas boias ondógrafo, colocadas em locais estratégicos, eram a única forma de caracterizar as condições do estado do mar. A leitura e consequentes resultados das boias traziam algumas limitações, pois só forneciam dados nesse ponto específico e sem qualquer possibilidade de previsão. Assim, surgiram os modelos numéricos que incluem a geração e propagação da agitação marítima e que permitem estimar as condições do estado do mar em qualquer ponto de uma dada área geográfica, fornecendo uma cobertura mais ampla que as boias, embora com as limitações inerentes às equações de base e aos métodos de resolução das mesmas e necessitando de dados de campo para a sua correcta calibração.

A reconstituição (*hindcast*) e a previsão (*forecast*) do estado do mar e da agitação marítima, em certos locais de interesse, são os principais resultados deste tipo de modelos.

O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999) – acrónimo de **S**imulating **W**aves **N**earshore – é um dos modelos acima referidos. É um modelo espectral de 3ª geração, que possui a capacidade de simular e descrever a propagação de ondas desde o largo até águas pouco profundas. A possibilidade de descrever o espectro de agitação marítima é um dos fatores mais importantes deste

modelo. Neste modelo entende-se por espectro de agitação marítima a representação espectral do somatório de um número discreto de ondas com diferentes frequências e direcções. Como tal, considera-se o SWAN um modelo de terceira geração.

O SWAN é utilizado essencialmente em zonas costeiras abertas. Considera os fenómenos de geração, propagação e dissipação da agitação marítima e baseia-se na equação da conservação da acção da onda. O modelo propaga a agitação marítima desde a zona de geração até próximo da costa obtendo, assim, parâmetros da ondulação característicos do local em estudo. Considera os processos físicos de refração, empolamento devido a alterações do fundo, correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade da onda (fenómeno de *whitecapping*), dissipação de energia devido ao atrito com o fundo, difracção em torno de obstáculos e reflexão devido a correntes opostas à agitação.

Para o processo de simulação da agitação marítima o modelo necessita de dados iniciais – *inputs* – para resolver as equações ao longo do tempo e do espaço. É necessário, então, fornecer: uma grelha computacional com informação batimétrica, com as respectivas dimensões e resolução do domínio de cálculo; a resolução temporal; as condições da agitação na fronteira de entrada do domínio de cálculo (condições de fronteira – ficheiro *TPAR*); informação sobre o regime (estacionário ou não estacionário) e, por último, os fenómenos físicos a ter em conta.

O modelo SWAN usa como variável dependente o espectro da densidade de acção da onda,  $N(\sigma, \theta)$ , em vez do espectro de densidade de energia,  $E(\sigma, \theta)$ , pois, na presença de correntes, a densidade de acção da onda é conservada enquanto a densidade de energia não o é. Como outras variáveis tem-se a *frequência relativa*  $\sigma$  e a *direcção da onda*,  $\theta$ . A densidade de acção é igual à densidade de energia dividida pela frequência relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.1)$$

A equação fundamental do modelo SWAN é a equação de balanço da densidade espectral de acção da onda, utilizada para descrever a evolução do espectro da onda, e dada por (SWAN, 2013b):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(C_g + U)N] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (3.2)$$

onde, o primeiro termo do membro esquerdo corresponde à parte cinemática; o segundo termo da equação define a propagação de energia das ondas através do espaço, no plano x-y, sendo a celeridade de grupo ( $C_g = \partial \sigma / \partial k$ ) definida através da relação de dispersão anteriormente apresentada (eq. 2.11); o terceiro termo representa a variação da frequência angular, devido a alterações na profundidade e a interacções com as correntes. Por último, o quarto termo representa a refração provocada pela variação do fundo e correntes. O segundo membro da equação corresponde aos termos fonte e sumidoro.

Em zonas costeiras existem seis processos que vão contribuir para os termos fonte e sumidouro da equação ( $S_{tot}$ ):

$$S_{tot} = S_{in} + S_{n13} + S_{n14} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (3.3)$$

O três primeiros termos da equação 3.3, correspondem ao crescimento das ondas provocado pelo vento, transferência de energia devido a interações entre três ondas (*triads*) e quatro ondas (*quadruplets*), respectivamente. Os últimos três termos correspondem à dissipação de energia por rebentação parcial (*whitecapping*), atrito do fundo e rebentação induzida pelo fundo (Holthuijsen, 2007).

Existem dois tipos de aproximação que descrevem os mecanismos de transferência da energia do vento para a superfície livre do mar. O primeiro, considera um crescimento da energia da onda linear no tempo, enquanto o outro defende que o processo de interação entre vento e ondas resulta num crescimento destas de forma exponencial (Ris, 1997). Com o contributo das teorias mencionadas, descreve-se o efeito do vento na superfície livre como um mecanismo de *realimentação*, iniciado por um crescimento linear:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (3.4)$$

onde o termo  $A$  descreve o crescimento linear da energia no tempo, devido a flutuações da pressão atmosférica induzidas pelo vento. A segunda parcela é relativa ao crescimento exponencial da energia. Ambos dependem da frequência e direcção da onda, da velocidade e direcção do vento.

As interações não lineares entre grupos de ondas poderão ter grande importância, uma vez que estas interações transferem energia entre si, distribuindo-a ao longo do espectro. Em águas pouco profundas, as interações entre grupos de três ondas (*triads*) dominam estes processos. O modelo SWAN descreve estas interações não lineares, através da aproximação de *Lumped Triad* (Silva, 2009):

$$S_{n13}(\sigma, \theta) = S_{n13}^-(\sigma, \theta) + S_{n13}^+ \quad (3.5)$$

Em zonas de profundidades maiores, a evolução espectral é dominada pelas interações *quadruplets*. Estas transferem a energia do pico do espectro, para zonas de frequências mais baixas (aumentando o período de pico) e mais elevadas (onde a energia é dissipada por *whitecapping*; Holthuijsen, 2007). A formulação DIA, utilizada pelo modelo, analisa dois grupos de quatro ondas que devem satisfazer as condições de ressonância, sendo por isso necessário que as componentes possuam direcções dentro de um limite restrito. Caso estejam garantidas as condições de ressonância é possível definir:

$$S_{n14}(\sigma, \theta) = S_{n14}^*(\sigma, \theta) + S_{n14}^{**} \quad (3.6)$$

onde  $S_{n14}^*$  corresponde ao primeiro grupo de ondas e  $S_{n14}^{**}$  corresponde ao segundo grupo.

O fenómeno de *whitecapping* é essencialmente controlado pela declividade da onda. Nos modelos de 3ª geração, como o presente, a formulação deste fenómeno é baseada no modelo de Hasselmann (1974) e é dada por:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = \Gamma \sigma^* \frac{k}{k^*} E(\sigma, \theta) \quad (3.7)$$

sendo  $\Gamma$  um coeficiente dependendo da declividade da onda,  $k$  o número de onda e  $\sigma^*$  e  $k^*$  a frequência média e o número de onda médio, respectivamente.

O atrito de fundo é modelado pelo SWAN através de várias formulações distintas, sendo a formulação empírica obtida na experiência *JONSWAP* (Hasselmann *et al.*, 1973) a utilizada no caso de estudo da presente dissertação. É baseada na seguinte expressão:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (3.8)$$

sendo  $C_b$  um coeficiente de atrito de fundo.

O SWAN apresenta como resultados (*outputs*), em qualquer ponto do seu domínio, variados parâmetros, como por exemplo: altura de onda significativa ( $H_s$ ), o período de pico ( $T_p$ ), e direcção média do período de pico ( $D$ ). Como qualquer modelo, este possui limitações na correcta representação de um estado de agitação marítima, que são devidas quer à formulação teórica em que o modelo se baseia, quer ao esquema numérico utilizado.

A calibração por defeito (*default*) do modelo utilizou dados da campanha do Projecto **JOint North Sea WAve Project** (*JONSWAP*), realizada no Mar do Norte (Hasselmann *et al.*, 1973). Devido a este facto, os parâmetros utilizados no espectro de ondas ou a dissipação de energia por atrito de fundo estão calibrados para essa mesma zona. Assim, tais parâmetros poderão não estar conformes para áreas com diferentes características de ondas (associadas ao estado de mar vaga e ondulação) ou diferentes características morfodinâmicas.

Note-se que, geralmente, o modelo numérico tem tendência a sobrestimar os valores medidos, o que pode fazer com que nem sempre os resultados alcançados sejam os esperados, à excepção da direcção de onda (Silva *et al.*, 2009). Para evitar estes resultados, deve-se fazer uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo aos principais parâmetros de entrada e, sempre que possível, calibrar o modelo com base em dados de campo.

### 3.3.2. ESTRUTURA DE CÁLCULO DO MODELO NUMÉRICO

O SWAN é um modelo numérico que propaga um dado espectro a partir do conhecimento das condições de fronteira, batimetria, domínio de cálculo, agitação, níveis de maré, vento e

correntes. O modelo permite considerar vários fenómenos físicos e, em alguns casos, alterar metodologias de cálculo por omissão, assim como definir os valores de alguns parâmetros.

O modelo trabalha a partir de uma série de ficheiros associados a um ficheiro principal (\*.swn) que contem todos os comandos utilizados. Este usa, por uma determinada ordem, variados comandos que transmitem ao SWAN as características da simulação.

Após a identificação da simulação, são inseridos uma primeira série de comandos de entrada do modelo (*MODEL INPUTS*), onde se definem os valores do nível de maré (ZH) em metros (comando *SET*) e a informação da convenção utilizada para as coordenadas (subcomando *CARTesian*), já que o modelo permite a entrada e saída de dados relativos à direcção dos ventos e das ondas na convenção náutica ou na cartesiana. Na convenção náutica, a medição é feita a partir do norte, no sentido dos ponteiros do relógio, até à direcção de onde sopram os ventos ou vêm as ondas. Na convenção cartesiana o norte é substituído pelo eixo das abcissas (xx's positivo) e a partir deste mede-se, no sentido contrário aos ponteiros do relógio, as direcções para onde o vento sopra ou para onde a onda segue.

No SWAN pode-se simular em modo estacionário ou não estacionário (*STATIONary* ou *NONSTationary*, respectivamente, do comando *MODE*). A diferença entre os dois tipos de corrida é:

- ∴ corrida estacionária: consiste numa simulação em que não são fornecidos ao modelo dados de entrada dependentes do tempo, isto é, para determinada condição de fronteira associada a um estado do mar único. Este tipo de simulação é realizada, por exemplo, para “espalhar” determinada agitação parâmetros pelo domínio de cálculo, de forma a ter uma percepção de quais as condições do estado do mar nesse mesmo domínio.
- ∴ corrida não estacionária: ao contrário da anterior, é uma simulação dependente do factor tempo, ou seja, é necessário dar ao modelo a informação temporal da simulação. Essa resolução temporal está directamente relacionada com os parâmetros da agitação marítima. Relativamente a estes dados, o modelo pode admitir um ficheiro (ficheiro *TPAR*) que contém o período de tempo da corrida e os dados de agitação marítima associados (ver ANEXO A).

Para os casos de estudo desta dissertação a simulação é feita em modo não estacionário.

Após a definição do tipo de simulação, escolhe-se o tipo de coordenadas a serem usadas (comando *COORDINATES*), podendo optar-se por coordenadas cartesianas ou esféricas, *CARTesian* ou *SPHERical*, respectivamente.

Para definir o domínio de cálculo da simulação, ou seja, a *computacional grid* (comando *CGRID*), pode-se optar por 3 tipos: *REGULAR*, *CURVILINEAR* e *UNSTRUCTURE*. Neste trabalho



será utilizada a malha *REGULAR* (comando *REG*, associado ao *CGRID*). Optou-se por este tipo de malha, por ser rectangular e uniforme em todo o seu domínio. Para a definir é necessário dar as coordenadas iniciais em ambos os eixos ( $x$ 's e  $y$ 's), a direcção, em graus, que esses eixos fazem com o sentido positivo do eixo  $x$ , o comprimento de cada lado da malha e, por último, definir a resolução da malha em ambos os eixos (Figura 3.8). Utilizam-se os subcomandos *CIRCLE* ou *SECTOR* para impor ao modelo quais as direcções predominantes dos dados de entrada (rumos das ondas e ventos). O primeiro diz que estes cobrem  $360^\circ$ , enquanto o segundo limita as direcções em sectores (consoante as direcções predominantes).

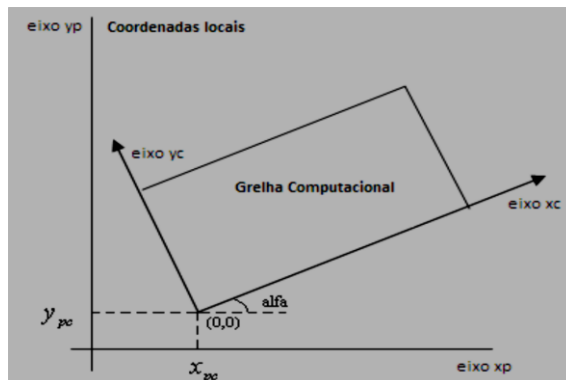


Figura 3.8 - Domínio de cálculo ( $x_c, y_c$ ) em relação ao sistema local de coordenadas ( $x_p, y_p$ ) (Adaptado de SWAN team, 2013)

A definição da malha batimétrica é idêntica ao domínio de cálculo. Tem de ser dado ao SWAN os dados relativos às coordenadas iniciais da batimetria, a inclinação dos eixos, o comprimento de cada lado e a sua resolução (comando *INPgrid*). Apenas foi utilizada a malha referente à batimetria (comando *BOTtom* associado ao anterior), excluindo-se assim, dados das malhas referentes ao nível do mar, correntes e atrito de fundo. O modelo obriga que a malha batimétrica tenha de ser maior ou igual à malha do domínio de cálculo, para que não haja pontos do domínio sem valores da batimetria.

Após definição do domínio da batimetria, é necessário fornecer ao modelo um ficheiro que contenha as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  de cada ponto da mesma. Assim, a partir de dados fornecidos pelo website <http://www.emodnet-hydrography.eu/>, obteve-se a batimetria do fundo que, através do comando *READinp BOTtom*, fornece ao SWAN os dados necessários para que esses valores sejam lidos e usados na simulação.

Relativamente às condições de fronteira da simulação, há dois aspectos que têm de ser focados: definição da orientação das fronteiras do domínio de cálculo e definição da entrada dos dados da agitação marítima. Por se ter optado por um domínio rectangular e uniforme, a definição da orientação das fronteiras torna-se mais fácil (ver Figura 3.9). Para os dados a introduzir nas fronteiras, o SWAN admite valores na forma espectral e paramétrica. Na forma espectral, o modelo utiliza um de dois espectros empíricos, *JONSWAP* e *Pierson-Moskowitz* (Ris, 1997). O

comando *BOUnd SHAPespec* define qual dos dois espectros é utilizado. Os dados paramétricos, devido ao caso de estudo ser uma simulação não estacionária, são fornecidos ao modelo através do ficheiro *TPAR* (ANEXO A) para forçar os parâmetros da agitação marítima numa das fronteiras do domínio. Através do ANEXO A.1, é possível verificar que a primeira coluna corresponde à data dos registos (formato ISO), a segunda coluna pertence aos valores de altura de onda significativa, sendo que as restantes três colunas, correspondem, respectivamente, à direcção, período e à direcção do espectro. Cada fronteira admite apenas um ficheiro de entrada. Através do comando *BOUndspec*, é definido a que fronteira corresponde o *TPAR*.

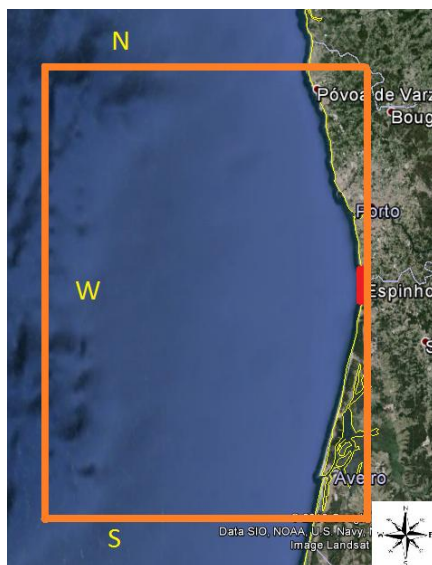


Figura 3.9 - Definição e orientação das fronteiras do domínio de cálculo (Adaptado de *Google Earth*).

Uma vez definidos o domínio de cálculo, a batimetria, as fronteiras e os ficheiros de entrada, o SWAN requer, também, a determinação sobre o modo em que a simulação se irá efectuar. Para o caso de estudo, realizam-se as simulações no modo de 3ª geração (comando *GEN3*). O modelo considera assim, o vento, as interações quádruplas e o *whitecapping*, como fenómenos a ter em conta. Devido ao fenómeno de *whitecapping* ser considerado, optou-se por adicionar a este o subcomando *WESTH*, com o objectivo de relacionar o *whitecapping* com o fenómeno de dissipação, apresentando assim, melhores resultados em comparação com outras possibilidades que o SWAN permite (*JANSsen* e *KOMen*). *Silva* afirma que a principal diferença entre *WESTH* e *JANSsen* e *KOMen*, advém desta não estar directamente dependente da declividade da onda, mas sim do número de onda.

Para além de se definir o modelo no modo de 3ª geração, tem de ser acrescentados outros comandos relativos a outros fenómenos que esse modo não abrange: *BREaking*, para considerar o fenómeno de rebentação; *FRICtion*, para assumir o atrito entre a onda e o fundo; e por último, o comando *TRIad* para accionar as interações não lineares triplas.

Na Tabela 3.2 apresenta-se um resumo da importância dos fenómenos que afectam a propagação das ondas em diferentes profundidades considerados no modelo SWAN.

Tabela 3.2 - Importância no SWAN dos diferentes processos que afectam a propagação das ondas em águas profundas, intermédias e pouco profundas (Battjes, 1994).

Processo	Águas profundas	Águas intermédias	Águas pouco profundas
Geração do Vento ( <i>GEN3</i> )	xxx	xxx	x
Interacções quádruplas ( <i>GEN3</i> )	xxx	xxx	x
Interacções triplas	-	-	xx
Rebentação parcial	-	xxx	x
Atrito de fundo	-	xxx	xx
Refracção	xxx	xxx	xx
Empolamento	-	xxx	xxx
Rebentação parcial	-	xxx	xxx
Reflexão	-	-	xxx
Difracção	-	-	x

xxx Dominante

xx Significativo

x Pouco relevante

- Irrelevante

O modelo SWAN apresenta três alternativas de esquema numérico a usar no processo de propagação da onda: *BSBT* – '*Backward Space, Backward Time*' – aplicado a casos estacionários e não estacionários; *S&L* – '*Stelling and Leendertse*' para casos não estacionários; e *SOR-DUP* – '*Second ORDer, UPwind*' – aplicado a casos estacionários. Para o caso de estudo, utilizou-se o comando *PROP BSBT*, pois trata-se de uma simulação não estacionária.

É ainda possível otimizar algumas definições numéricas através do comando *NUMERIC ACCUR NONSTAT 10*, que melhora a computação ao longo das simulações feitas.

O modelo SWAN permite realizar múltiplas corridas através de um sistema de malhas encaixadas, ou seja, é possível definir domínios ligados entre si com diferentes dimensões e resoluções, de modo a obter uma descrição mais realista dos parâmetros da agitação marítima numa dada zona (ver Figura 3.10).

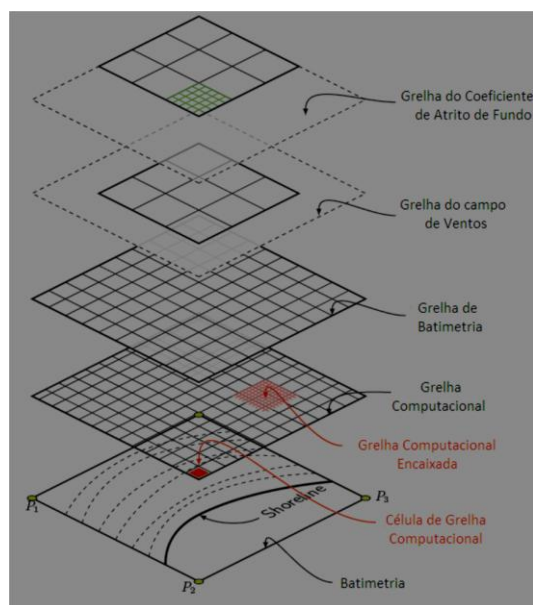


Figura 3.10 - Ilustração das várias malhas que podem ser usadas no SWAN.

No caso de se utilizarem duas malhas encaixadas, utilizam-se comandos diferentes para cada malha. Como já foi determinada a primeira malha (de menor resolução e maior área) através do *CGRID*, utiliza-se o comando *NGRID*, onde são definidas as coordenadas, dimensões e resolução (com  $n-1$  pontos) da malha de maior resolução. Após a definição da nova malha, utiliza-se outro comando (*NEST*), que vai originar um novo ficheiro, de onde resultam os valores do espectro a serem utilizados nas fronteiras do domínio da segunda, assim como a data de início dessa simulação e duração de cada passo de cálculo. Para a malha de menor dimensão e de maior resolução é necessário utilizar o comando *BOUNDnest1*, que usa os resultados da 1ª malha como dados de entrada em vez dos dados fornecidos pelos comandos anteriormente descritos (*BOUND SHAPespec* e *BOUNDspec*).

A possibilidade do SWAN fornecer resultados que podem ser utilizados directamente por outros programas é uma mais-valia para a análise dos dados resultantes das corridas efectuadas. Assim, através do comando *BLOCK* pode-se criar um *output* que poderá vir a ser editado, por exemplo, pelo software *MATLAB*® (extensão \*.mat) (ver Figura 3.11) e cujos parâmetros de saída em cada ponto da malha são: as coordenadas do ponto (*XP YP*); a altura de onda significativa (*Hs*), o período médio (*T*), a direcção (*D*) e a batimetria (*BOTL*). A data inicial e a duração de cada passo para leitura destes parâmetros, também está contida no comando. Também é possível obter *output's* no formato *ASCII* (extensão \*.tbl) (ANEXO B), para isso é necessário dar ao SWAN a localização de um ponto dentro do domínio de cálculo (comando *POINT*) e solicitar ao modelo, através do comando *TAB*, os parâmetros para um determinado período de tempo em que a simulação decorra.

Por último, utiliza-se o comando *COMPUTE*, para que o SWAN comece a simulação de todo o conjunto de comandos utilizado. Só através deste comando é possível que o SWAN

assuma todos os comandos atrás indicados e comece o cálculo, de maneira a que a corrida seja efectuada com todas as características requeridas pelo usuário.

### 3.3.3. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO MODELO

Os modelos numéricos possuem, como é o caso do SWAN, uma série de parâmetros que precisam ser calibrados de maneira a chegar a resultados fiáveis. A calibração desses parâmetros é realizada através de uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo à variação dos diferentes parâmetros e da comparação dos resultados do modelo com dados de campo ou casos de teste da literatura.

Neste caso, foi necessário efectuar uma série de testes ao modelo de maneira a chegar à definição do melhor conjunto de dados e parâmetros a utilizar na simulação a ser realizada no caso de estudo. Assim, foram feitos ajustamentos, através de uma calibração manual (tentativa e erro), a partir de alguns exemplos dados pelo *SWAN Support Package*, facultado pelo website <http://www.digital-hydraulics.com>. De qualquer forma, os testes conduzidos não constituem uma calibração do modelo, pois isso requeria a comparação com valores medidos para a zona de estudo, os quais não se conhece existirem.

#### 3.3.3.1 TESTE HARINGVLIET

Após uma primeira análise do funcionamento do modelo com base no seu manual, foram realizadas as simulações relativas aos exemplos mencionados no website identificado acima (*field cases*). O teste *Haringvliet* (ANEXO C) serviu de base para todas as simulações efectuadas nesta primeira fase de testes. Este caso de teste corresponde a um estuário na costa Oeste da Holanda e serviu para compreender o essencial dos comandos do SWAN. De notar que nos testes realizados foram, muitas vezes, alterados alguns comandos de forma a chegar a um melhor resultado.

O primeiro passo desta calibração foi definir os eixos de coordenadas (ver Figura 3.12) –  $x$  e  $y$ , de onde se pretende extrair os parâmetros  $H_s$ ,  $T_p$  e  $D$ , de todos os testes efectuados. Optou-se por definir 21 pontos ao longo de cada eixo (nas coordenadas  $(x, 11000)$  e  $(14355, y)$ ), para retirar os parâmetros da onda, de maneira a poder comparar resultados em pontos específicos do domínio de cálculo. Dos 21 pontos escolhidos no eixo dos  $xx$ 's, apenas 16 estavam localizados no mar, como tal, apenas foram analisados esses 16 pontos. Já no eixo dos  $yy$ 's, apenas 12 pontos de 21 possíveis, se encontravam no mar. As 21 localizações em cada eixo, são denominadas no teste por "bóia". A bóia nº1 do eixo  $(x, 11000)$  é o primeiro ponto mais à esquerda desse eixo e coincide com a localização mais afastado da costa.

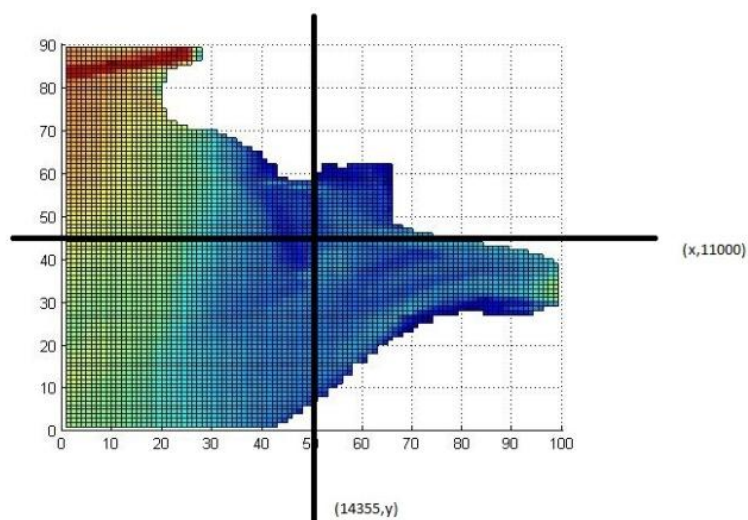


Figura 3.11 - Domínio do teste *Haringvliet* e definição dos pontos para saída de resultados.

Foram efectuados dois testes, com obtenção de resultados em cada um dos eixos:  $(x,11000)$  – *Teste\_1.1* (ANEXO D) e  $(14355,y)$  – *Teste\_1.2*. A diferença entre eles é apenas o eixo utilizado para extrair os resultados, não havendo qualquer diferença nos dados das simulações. Como tal, apenas será aqui apresentado o *Teste\_1.1*.

O período de tempo da simulação foi das 15:00:00 até às 23:00:00, com corridas espaçadas de 2 horas.

Para analisar os resultados das simulações, criou-se um código em *MATLAB*<sup>®</sup> (ANEXO E), que torna possível trabalhar os resultados do modelo, obtendo gráficos, tabelas, etc., de uma forma rápida, facilitando o tratamento dos resultados do modelo.

O primeiro teste (teste nº 1) efectuado, teve diversas alterações relativamente às condições de simulação do teste *Haringvliet* original:

- ∴ simulação em modo não estacionário (o original era em modo estacionário), já que este é o modo a utilizar nesta dissertação;
- ∴ forçamento dos dados de entrada na fronteira oeste, através do ficheiro *TPAR*, já que esta simulação é não estacionária;
- ∴ teste dos comandos *PROP BSBT* e *NUM ACCUR NONSTAT 10*.

Neste primeiro teste foi realizada uma corrida estacionária para o tempo inicial da corrida, isto é, para as 15:00:00, de forma a obter as condições iniciais da corrida não estacionária em todo o domínio.

Para o teste nº 2, utilizou-se toda a base/comandos do teste nº 1, alterando:

- ∴ a entrada dos dados da fronteira oeste (*w*) para sul (*s*);

∴ o comando *default* relativo à forma do espectro da onda (*BOUND SHAP*) de *PEAK DSPR POWER* para *MEAN DSPR DEGREES*, com o objectivo de perceber qual seria a melhor forma de definir o espectro na fronteira da *computacional grid*.

No teste nº 3, foi acrescentado ao comando *GEN3* o método de geração *WESTH*, como foi descrito no capítulo 3.3.2.

A única alteração no teste nº 4 foi a não realização da corrida estacionária inicial. Foram utilizados todos os comandos do teste nº 1.

No teste nº 5 realizaram-se corridas estacionárias para as 15h, 17h, 19h, 21h e 23h. Este teste teve como objectivo perceber se era necessário realizar uma corrida estacionária para todas as horas de simulação. Utilizaram-se todos os comandos do teste nº1.

Para comparar os resultados de cada um dos testes, calcularam-se os valores da altura de onda significativa, *Hs*, em cada um dos 16 pontos (boias) do eixo xx para cada instante de cálculo. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 3.13 a 3.17.

Da análise dos resultados dos vários testes para o primeiro instante da simulação (15:00:00), ver Figura 3.13, verificamos que os testes nº1, 3 e 5, apresentam valores de *Hs* praticamente coincidentes entre si, com diferenças máximas de 0,011 metros. Esta semelhança leva a concluir que os comandos utilizados nesses três testes não influenciam significativamente o resultado do modelo. O ficheiro *TPAR* utilizado nos testes indicava, para as 15:00:00, uma altura de onda significativa com um valor de 1,0 m. O teste nº 2, por ter sido alterado o comando relativo à forma do espectro, apresenta valores iniciais diferentes desse valor. Este facto deve-se não ao comando *MEAN*, já que este apenas é aplicado ao período de onda de ordem 1 –  $T_{m01}$ , mas sim ao comando *DEGREES*, uma vez que este influencia directamente a largura da distribuição direcional do espectro e, por sua vez, influencia os parâmetros da onda. Por essa razão, o valor inicial do teste nº 2 não é de 1,0 m, como indicado no *TPAR*. Relativamente ao teste nº4, uma vez que não foi feita a corrida estacionária para as 15:00:00, a simulação toma o valor inicial da altura de onda significativa indicado no ficheiro de forçamento, porém para as restantes bóias, não é feita uma simulação coerente, dando sempre valores inferiores aos outros testes.

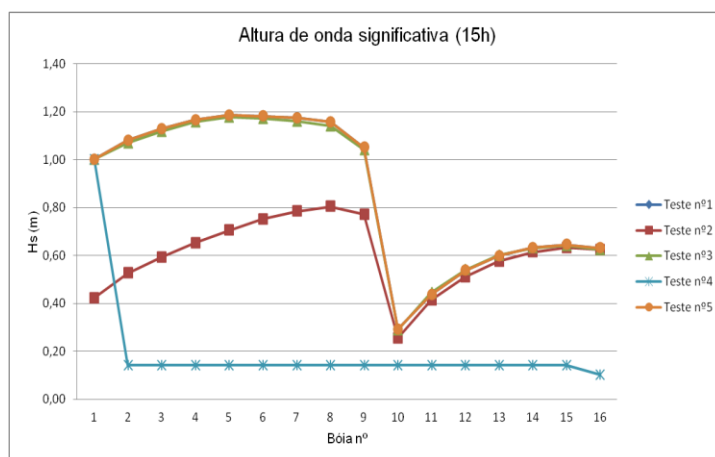


Figura 3.12 - Gráfico de altura de onda significativa para as 15 horas, referente aos 5 testes.

Os resultados obtidos para as 17 horas (ver Figura 3.14), mostram que, uma vez mais, os testes nº1, 3 e 5, dão valores de  $H_s$  praticamente coincidentes, com diferenças inferiores a 0,014 metros, o que leva a concluir que, para este segundo instante da simulação, os comandos associados a esses testes não alteram significativamente os resultados esperados. Neste instante (17:00:00), o teste nº4 apresenta valores de  $H_s$  praticamente coincidentes como os anteriores para as bóias nº 1 a 10, aumentando ligeiramente a diferença à medida que se aproxima da costa, com uma diferença máxima entre valores do teste nº 1 de 0,059 metros. Assim, pode concluir-se que a não realização de uma corrida estacionária para o primeiro instante (15:00:00) não tem uma influência significativa nos resultados dos instantes posteriores, especialmente nos valores de  $H_s$  mais perto da fronteira de entrada. Os testes nº 1, 3, 4 e 5 têm, na bóia nº 1, um valor de altura de onda significativa coincidente com o que consta no *TPAR*. Uma vez mais, o teste nº2, apresenta um valor inicial de  $H_s$  diferente do ficheiro de forçamento e, como tal, diferente dos restantes testes. Porém, a partir da bóia nº10 (localização mais perto da costa), toma valores de altura de onda significativa próximos dos valores dos restantes testes, com diferenças máximas de 0,032 metros.

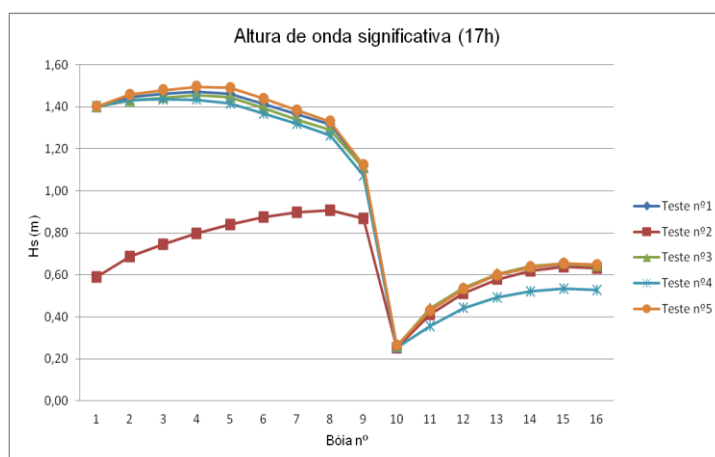


Figura 3.13 - Gráfico de altura de onda significativa para as 17 horas, referente aos 5 testes.



Da análise dos resultados para o terceiro instante de cálculo (ver Figura 3.15) é possível observar que, de igual modo que no tempo de simulação anterior, os testes nº1, 3, 4 e 5, dão valores de  $H_s$  muito semelhantes. O teste nº2 mantém-se com a mesma forma que no tempo de cálculo anterior, ou seja, uma vez mais, conclui-se que a largura da distribuição direcional do espectro influencia os parâmetros da onda em zonas mais ao largo.

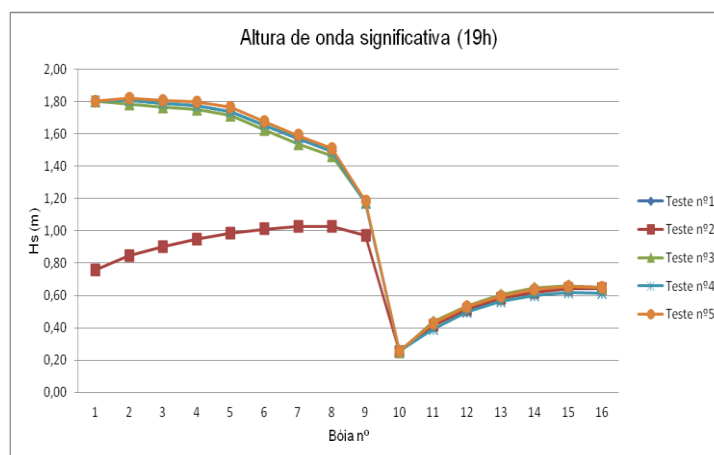


Figura 3.14 - Gráfico de altura de onda significativa para as 19 horas, referente aos 5 testes.

A altura de onda significativa no 4º instante de cálculo, 21 horas (ver Figura 3.16) mostra que, desde a 2ª bóia até à 16ª, os valores de  $H_s$  são muito semelhantes, com diferenças máximas de 0,023 metros. Apenas para a bóia nº1, o valor de  $H_s$  do teste nº2 não toma, uma vez mais, o valor proposto pelo *TPAR*, tomando um valor superior aos obtidos nos instantes de simulação anterior e, neste instante de cálculo, superior aos dos restantes testes.

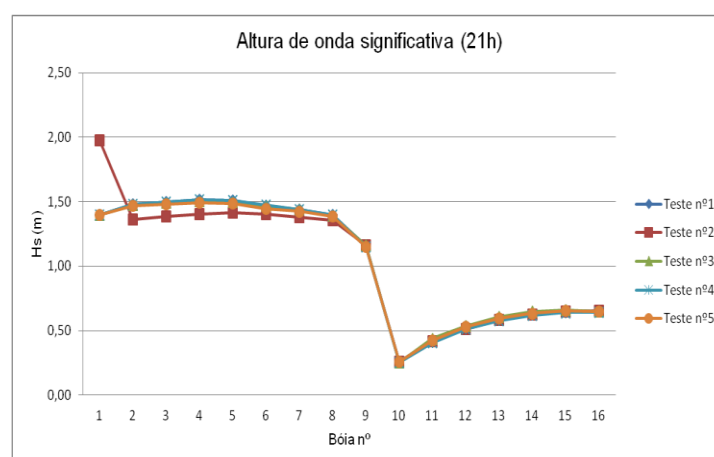


Figura 3.15 - Gráfico de altura de onda significativa para as 21 horas, referente aos 5 testes.

Por último, analisando os resultados para o último instante de cálculo, 23 horas (ver Figura 3.17), é possível verificar que todos os testes apresentam valores próximos (diferenças máximas de 0,027 metros), mas continua a diferença relativamente à altura de onda significativa das primeiras bóias no teste nº2.

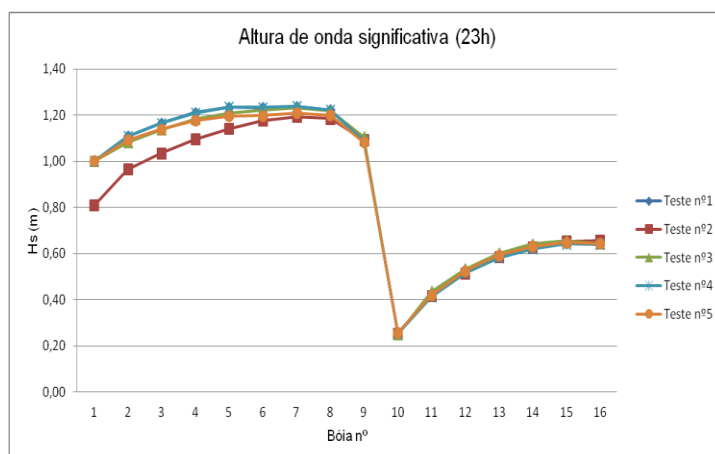


Figura 3.16 - Gráfico de altura de onda significativa para as 23 horas, referente aos 5 testes.

Assim, as principais conclusões a retirar da análise dos resultados dos testes de sensibilidade realizados são:

- ∴ verificou-se a necessidade de realizar uma corrida estacionária para o primeiro tempo da simulação;
- ∴ relativamente à forma do espectro, os resultados alcançados em todos os passos, pelos subcomandos *MEAN* e *DEGREES*, não foram coerentes, devendo optar-se, assim, pelos subcomandos *PEAK* e *POWER*;
- ∴ não houve alteração significativa nos resultados com o método de geração escolhido, podendo optar-se pelo comando *GEN3 WESTH*;
- ∴ não parece existir vantagem em realizar simulações estacionárias para todos os instantes da simulação.

### 3.3.3.2 TESTE DE ESPINHO

Com base nos resultados dos testes da corrida *Haringvliet*, deu-se início a um novo teste com as opções de comandos resultantes dessa análise. Assim, iniciou-se uma nova série de simulações com as seguintes condições/alterações impostas:

- ∴ definição de duas malhas encaixadas, com dimensão, coordenadas e resoluções diferentes (como foi descrito no capítulo 3.3.2);
- ∴ conversão dos rumos das ondas dados pelo ficheiro *TPAR* (dados de forçamento de entrada nas fronteiras da malha) de náuticos a cartesianos;
- ∴ o vento (velocidade e direcção) não é considerado;
- ∴ determinação das localizações de onde se vão retirar os parâmetros da intensidade energética;
- ∴ necessidade de impor para cada fronteira o respectivo ficheiro de entrada.

Como este teste teve como objectivo verificar a simulação de duas malhas encaixadas, houve a necessidade de realizar duas corridas para o mesmo caso de teste, isto é, uma primeira corrida relativa à malha mais grosseira, de onde se vão retirar os dados de entrada que serão utilizados na segunda corrida relativa à malha mais refinada.

Através do *MATLAB*<sup>®</sup>, criou-se um código que converte os rumos das ondas (ANEXO F), de forma a conseguir obter as direcções correctas nas corridas efectuadas (Figura 3.17). Esta necessidade deveu-se a uma incompatibilidade do SWAN em trabalhar com coordenadas cartesianas e rumos náuticos. Assim, após a conversão dos rumos, foram criados três ficheiros *TPAR*, um para cada fronteira. Os dados de entrada foram impostos às três fronteiras da malha, ou seja, a norte, oeste e sul. O período de cálculo do teste acima referido foi entre 14 e 20 de Janeiro de 1953, com um passo temporal hexa-horário.

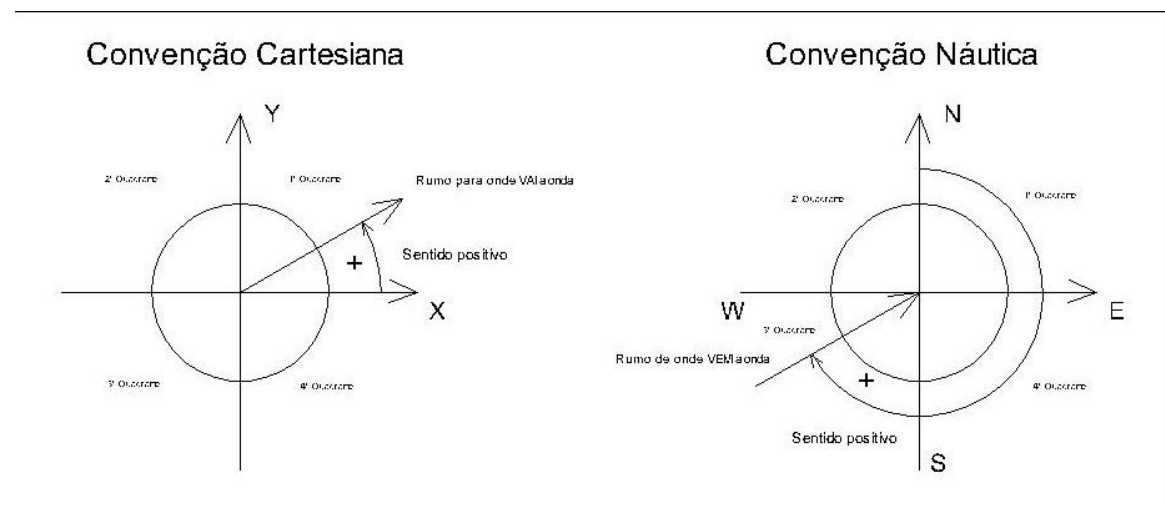


Figura 3.17 - Convenção das direcções de onda.

O SWAN admite que, para cada fronteira do domínio de cálculo, pode ser associado um ficheiro com os parâmetros de agitação. Este teste serviu, também, para perceber quais as diferenças em admitir que cada fronteira tem associada a si um ficheiro de entrada independente. Realizaram-se duas simulações distintas, com duração mais curta, de modo a analisar as diferenças entre:

- ∴ associar às três fronteiras do domínio três ficheiros *TPAR*;
- ∴ apenas forçar a fronteira paralela à linha de costa, através de um ficheiro *TPAR*.

Nos testes de sensibilidade ao modelo realizados optou-se por não impor nenhuma condição relativa ao vento. Assim, admitiu-se que, em todo o domínio testado, as condições do vento – velocidade e rumo – seriam nulas. Note-se que o SWAN admite o forçamento conjunto de ondas e vento, mas devido ao pequeno domínio de cálculo, em relação à escala oceânica, optou-se por não forçar o modelo com ventos.

Como anteriormente referido, foram utilizados os comandos *BREaking*, *FRICtion* e *TRIad*.

Este teste de Espinho serviu, também, para definir quais as localizações onde se irão obter os resultados que serão utilizadas no caso de estudo desta dissertação. Foram definidas vinte e seis localizações espaçadas entre si em 500 metros e, sensivelmente, a uma profundidade de 15 metros. Com base nos resultados nestes 26 pontos serão calculados os valores da intensidade energética.

Relativamente ao teste efectuado para definir o forçamento para uma ou para três fronteiras, observou-se que, de facto, obtiveram-se resultados mais satisfatórios quando se forçou a simulação nas três fronteiras do domínio de cálculo.

Para a simulação com forçamento apenas na fronteira *W*, verificou-se que os resultados eram bastante diferentes consoante os rumos impostos pelo *TPAR*. Distinguiram-se 3 tipos de direcções diferentes:

- ∴ direcções do 1º quadrante (0° a 90°);
- ∴ direcções dos 2º e 3º quadrantes (90° a 270°);
- ∴ direcções do 4º quadrante (270° a 360°).

Ao analisar a direcção da onda incidente na fronteira, verificou-se que, de facto, na fronteira onde foi imposta, o rumo coincidia com o suposto. Porém, nas fronteiras adjacentes, observou-se uma rotação da direcção em quase 270° (ver Figura 3.19). Tal rotação, não seria fisicamente possível em tão pouca distância. A fronteira Norte não sofre a mesma rotação que a anterior, já que as ondas vindas SW propagam-se correctamente para essa fronteira.

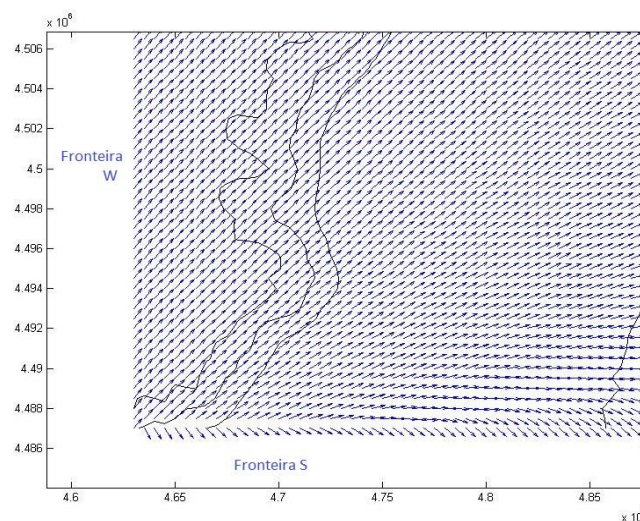


Figura 3.18 - Direcções provenientes do 1º quadrante, nas fronteiras *W* e *S* (forçamento na fronteira *W*).

Quanto à altura de onda significativa observou-se que, os valores impostos na fronteira forçada eram os esperados. No entanto, ao analisar a Figura 3.20, verificou-se que existia uma área de sombra junto à fronteira S, devido à rotação das direcções nessa fronteira o que leva a obter valores de  $H_s$  muito inferiores. Verifica-se uma variação de altura de onda consistente como a que se observa, por difracção da onda, na zona de sombra de um quebra-mar fictício colocado ao longo da fronteira Sul.

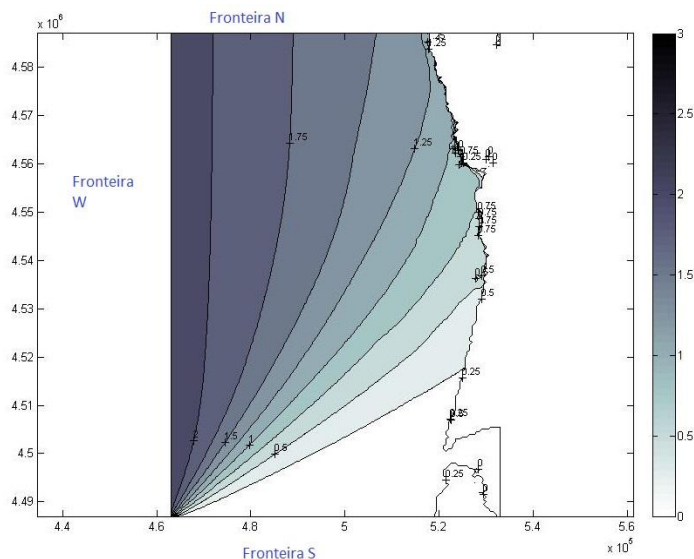


Figura 3.19 - Altura de onda significativa no domínio de cálculo para rumos provenientes do 1º quadrante (forçamento na fronteira W).

Quando se impõem rumos de ondas provenientes dos 2º e 3º quadrantes na fronteira Oeste (isto é, para ondas provenientes da costa com rumos entre 0º e 180º), a simulação feita pelo SWAN revela uma grande discrepância (ver Figura 3.21). A fronteira forçada, toma os valores fornecidos pelo ficheiro porém, observa-se que os pontos logo a seguir sofrem uma rotação de sensivelmente 90º que é fisicamente irrealista face à batimetria e processos de geração e propagação de ondas. O mesmo acontece nas fronteiras perpendiculares à linha de costa, que também rodam cerca de 90º em direcção oposta. Assim, é possível dizer que para estas direcções, os resultados do modelo estão incorrectos.

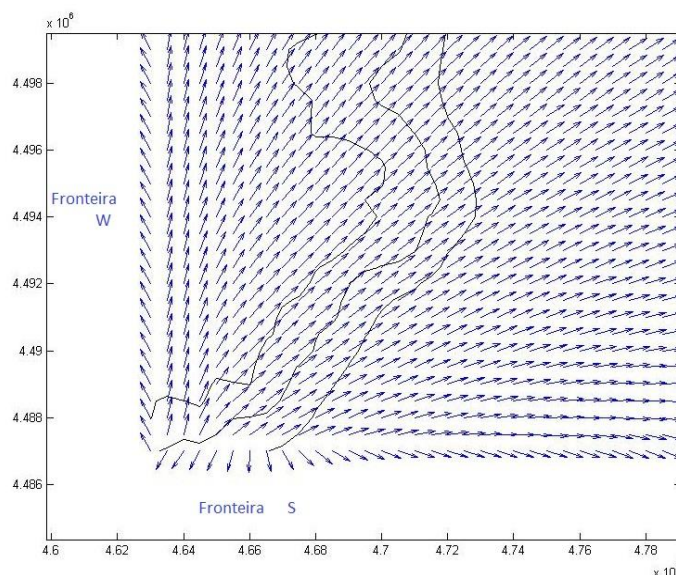


Figura 3.20 - Direcções provenientes dos 2º e 3º quadrantes, nas fronteiras W e S (forçamento na fronteira W).

Os dados determinados pela bóia ao largo da Figueira da Foz indicam que em determinados instantes, existem ondas com direcções vindas dos 2º e 3º quadrantes, ou seja, provenientes de terra. Este facto pode ocorrer devido a ventos fortes vindos de Este (ventos costeiros), que com um fetch significativo, fazem com que a direcção da onda tome esses rumos. Assim, para essas condições de vento e de estado do mar, é expectável que junto à costa a altura de onda significativa seja inferior a 0,5 metros, isto é, da ordem de grandeza dos resultados do modelo para estas condições, apesar de a sua aplicação estar incorrecta.

No caso de rumos provenientes do 4º quadrante (270º a 360º), é possível observar que em toda a fronteira W os valores são os indicados no ficheiro de entrada. Este é o caso onde se registam mais observações, sendo o quadrante predominante das direcções incidentes no litoral de Portugal (ver subcapítulo 2.2). Verifica-se, tal como aconteceu para ondas provenientes do 1º quadrante, que ocorre uma zona de sombra (ou de difracção) das ondas na fronteira onde deveriam também, entrar as ondas (neste caso a Norte) (Figura 3.22). O mesmo não acontece na fronteira S, uma vez que as direcções das ondas incidem directamente sobre essa fronteira, vindas da fronteira Oeste.

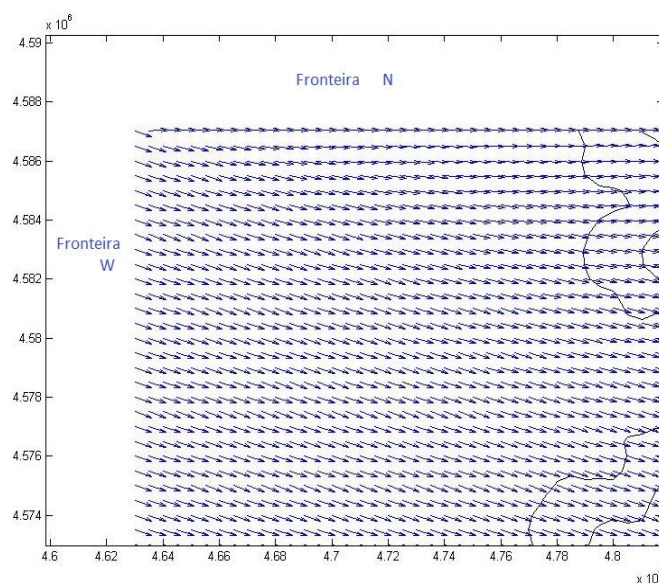


Figura 3.21 - Direcções provenientes do 4º quadrante, nas fronteiras *W* e *N* (forçamento na fronteira *W*).

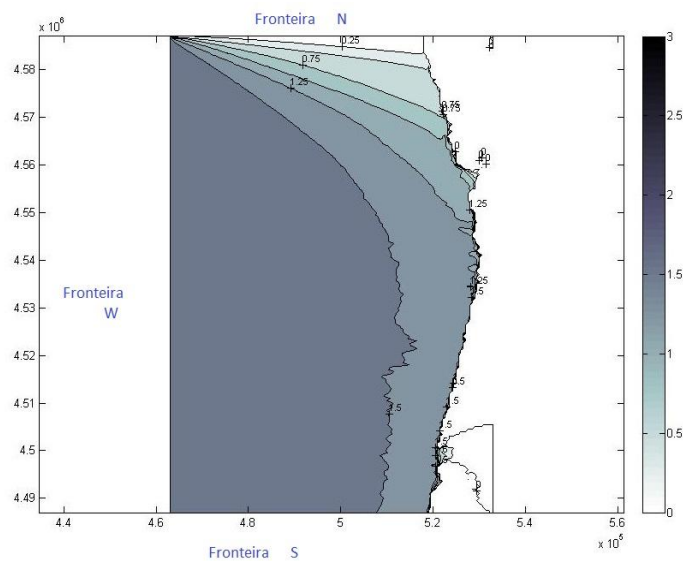


Figura 3.22 - Altura de onda significativa no domínio de cálculo para rumos provenientes do 4º quadrante (forçamento na fronteira *W*).

Verificou-se, através da análise da simulação com forçamento nas três fronteiras que, comparativamente à simulação anterior obtiveram-se melhores resultados. Foram forçadas as três fronteiras (Norte, Oeste e Sul), com diferentes rumos de ondas, de maneira a verificar qual seriam as principais diferenças entre simulações.

Para rumos provenientes do 1º quadrante impostos nas fronteiras *N*, *W* e *S* verificou-se que, nessas fronteiras os rumos coincidiam com o suposto. A Figura 3.24 mostra que os rumos na fronteira *W* e *S* são idênticos. Em todo o domínio de cálculo, as direcções das ondas seguem o percurso natural (refracção).



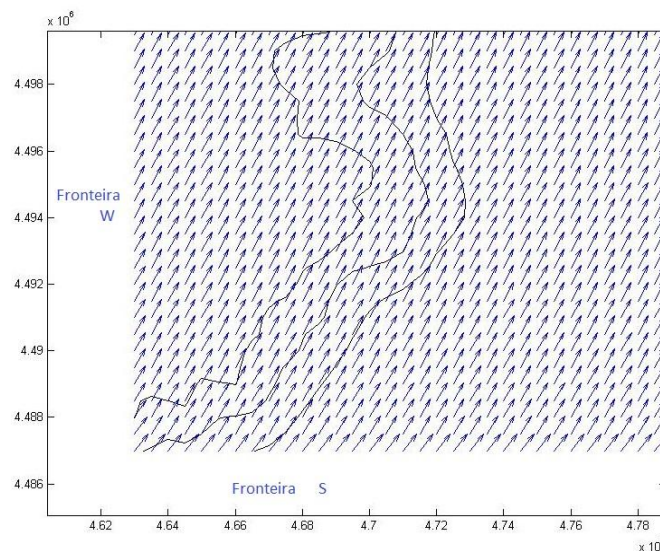


Figura 3.23 - Direcções provenientes do 1º quadrante, nas fronteiras W e S (forçamento nas três fronteiras).

Uma vez que os rumos impostos nas três fronteiras são originários do 1º quadrante, é possível verificar (Figura 3.25) que os valores de  $H_s$  estão relativamente bons. Apenas, junto à fronteira S, esses valores não são coerentes devido ao forçamento efectuado.

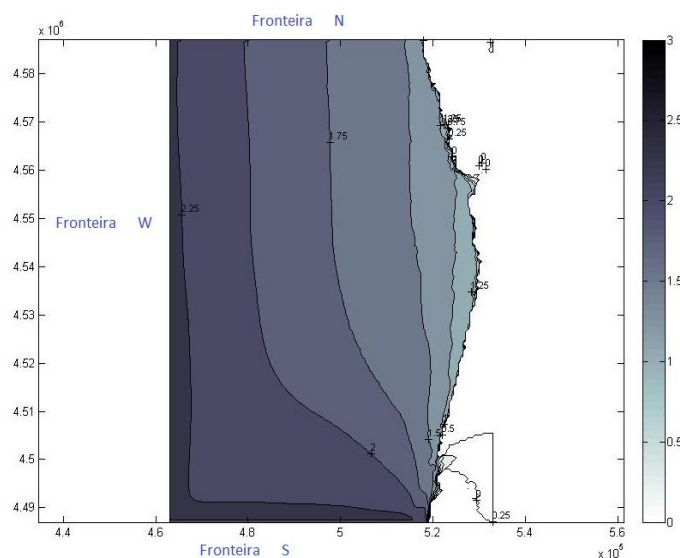


Figura 3.24 - Altura de onda significativa no domínio de cálculo para rumos provenientes do 1º quadrante (forçamento nas três fronteiras).

Observando a Figura 3.26, vemos que o rumo da fronteira N coincide com o forçamento efectuado (direcções provenientes dos 2º e 3º quadrantes), porém existe uma grande discrepância nos rumos imediatamente a seguir aos dessa fronteira. Este facto deve-se ao problema de impor à fronteira do domínio de cálculo rumos provenientes de terra. É possível observar também que, junto à zona costeira, ocorrem ondas propagando-se do largo para terra, incompatíveis com o forçamento correspondente a ondas geradas junto à costa, propagando-se ao largo.



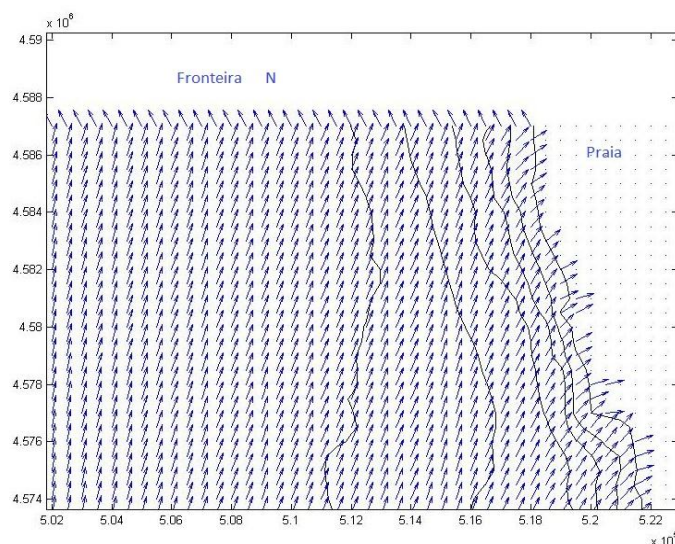


Figura 3.25 - Direcções provenientes dos 2º e 3º quadrantes, na fronteira *W* e na zona costeira (forçamento nas três fronteiras).

Para ondas provenientes dos 2º e 3º quadrantes, o mesmo padrão de incoerência e incompatibilidade entre forçamento e condições fronteira transparece nos resultados de altura de onda (Figura 3.27).

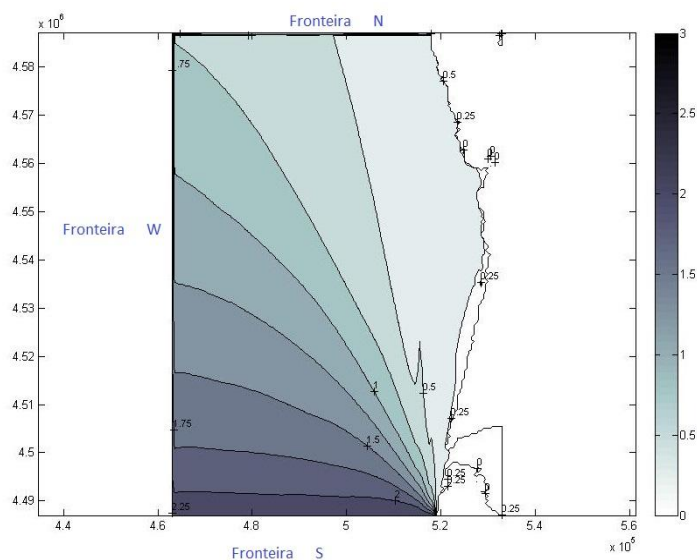


Figura 3.26 - Altura de onda significativa no domínio de cálculo para rumos provenientes dos 2º e 3º quadrantes (forçamento nas três fronteiras).

Analisando as direcções vindas do 4º quadrante no domínio de cálculo, consegue-se observar (Figura 3.28) que em ambas as fronteiras (*N* e *W*) os valores correspondentes ao ficheiro de entrada são coincidentes. Uma vez mais, as direcções de onda originárias do quadrante *N-NW*, são as que reflectem uma melhor distribuição dos seus parâmetros.

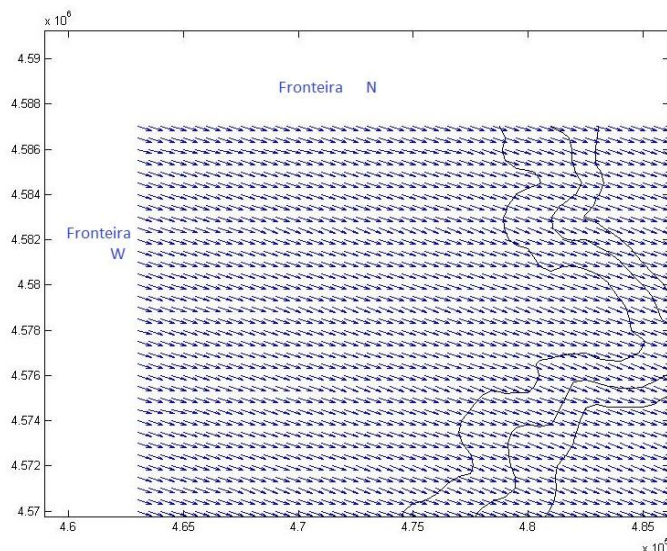


Figura 3.27 - Direcções provenientes do 4º quadrante, nas fronteiras W e N (forçamento nas três fronteiras).

Relativamente aos valores de  $H_s$ , para direcções de onda provenientes do 4º quadrante, no domínio de cálculo da simulação verificou-se que apenas na fronteira N (junto à costa) os valores não são menos coerentes, como se pode observar na Figura 3.29. No restante domínio de cálculo verifica-se uma descida gradual nos valores de  $H_s$  desde a fronteira onde houve o forçamento da altura de onda significativa, até à costa.

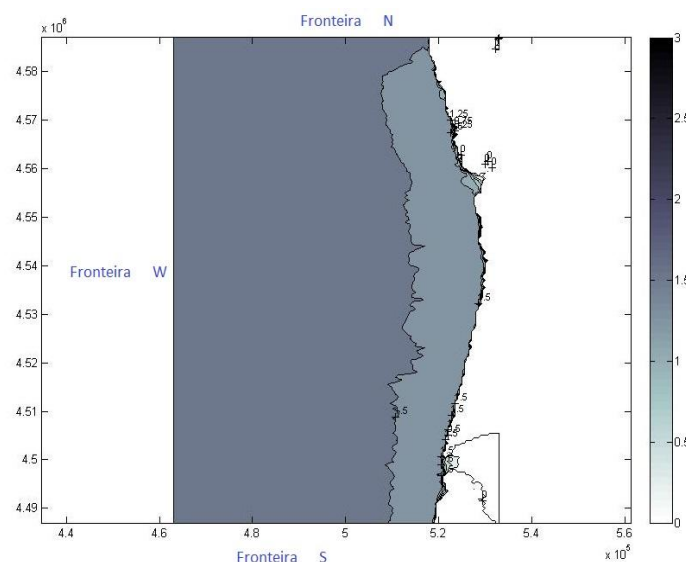


Figura 3.28 - Altura de onda significativa no domínio de cálculo para rumos provenientes do 4º quadrante (forçamento nas três fronteiras).

Através da observação e análise dos resultados, ficou nítido que o forçamento nas três fronteiras do domínio ao invés do forçamento apenas na fronteira paralela à linha de costa resulta numa melhor simulação, garantindo assim, que estes mostrem o que realmente acontece na área de simulação e, por sua vez, no caso de estudo.

Para verificar se seria necessário utilizar o sistema de malhas encaixadas para o caso de estudo, efectuou-se outro teste. Com o objectivo de comparar os resultados dos parâmetros da onda, realizaram-se duas simulações distintas: a primeira recorrendo ao sistema de malhas encaixadas (malha *offshore* e malha *inshore*) e outra apenas com recurso a uma malha. O período de tempo simulado foi de dois meses e recorreu-se ao forçamento nas três fronteiras. Definiram-se 3 localizações com batimetria próxima dos 15 metros, de onde foram retirados os valores de altura de onda significativa, direcção e período. A partir da comparação dos parâmetros obtiveram-se as seguintes conclusões:

- ∴ as diferenças médias dos valores de altura de onda significativa para os pontos nº1 e 2, entre a simulação recorrendo a malhas encaixadas e a simulação apenas com uma malha, foram de 0,013 metros. Para a localização nº3, as diferenças rondaram os 0,007 metros.
- ∴ relativamente às diferenças médias dos rumos das ondas, entre simulações, obteve-se para a localização nº1 um valor de 0,192°; para o ponto nº2, uma diferença média de 0,703° e por último, para a 3ª localização, uma diferença de 0,535°.
- ∴ a diferença do período de pico entre simulações, para a localização nº1 foi de 0,066 segundos; para a localização nº2, foi de 0,064; para a localização nº3, obteve-se uma diferença média de 0,054.

Assim, é possível concluir que as diferenças, entre simulações, dos parâmetros de onda são insignificantes. Como tal, poupando tempo de computação, optou-se por utilizar no caso de estudo apenas a malha *offshore*.



## 4. CASO DE ESTUDO

### 4.1. O LITORAL DE ESPINHO

O concelho de Espinho pertence à Área Metropolitana do Porto (AMP) e faz parte do distrito de Aveiro. Com 21,11 km<sup>2</sup> de área, é constituída por 5 freguesias (Anta, Guetim, Espinho, Paramos e Silvalde) com uma população total de 31 786 (INE, 2011). Espinho nasceu, aparentemente, na praia, tendo naturalmente uma forte ligação ao mar. Desde o seu nascimento, foi uma zona fustigada pela bravura do mar (Figura 4.1). Como tal, tornou-se uma zona de risco muito elevado, ainda mais devido às suas condições naturais. A costa de Espinho localiza-se numa zona de inflexão da costa, a qual tem orientação geral *NNW-SSE* para norte, onde predominam afloramentos rochosos e a sul, *NNE-SSW*, exclusivamente arenosa.

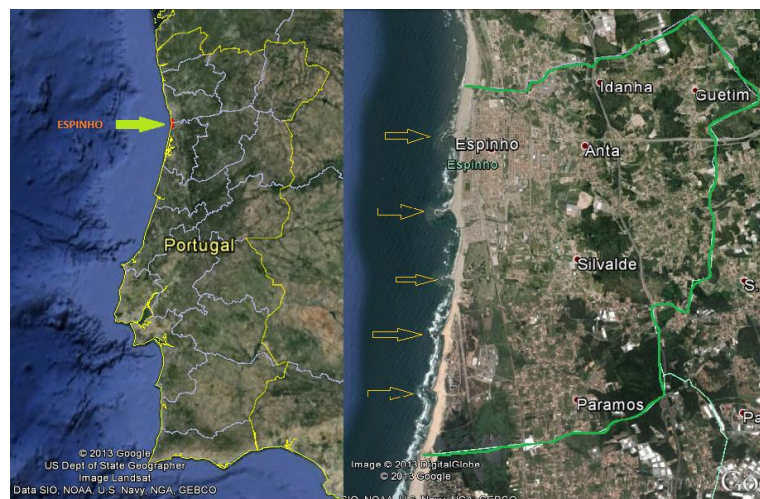


Figura 4.1 - Localização de Espinho e dos esporões adjacentes à praia de Espinho (Fonte: *Google Earth*).

A zona de Espinho constitui, em Portugal, o caso mais antigo e importante de erosão costeira (Figura 4.2). Os problemas provenientes de grandes temporais nesta zona reportam-se ao século passado. Como tal é imprescindível e urgente que se tornem medidas preventivas neste litoral, de maneira a que a influência desses períodos de tempestade não atinjam com tanta gravidade a costa de Espinho.



Figura 4.2 - Efeitos da erosão sobre a praia entre Esmoriz e Furadouro, Espinho 2009 (fonte: *skyscraper-city.com*)

Considerando que a maré viva cheia pode atingir quase 4 metros (ZH), que o *storm surge* pode sobrelevar esse nível de cerca de 1 metro e atendendo a que as ondas de temporal têm altura significativa de cerca de 12 metros e altura máxima de cerca 21 metros, conclui-se que a maior parte do litoral de Espinho está sujeito a um risco muito elevado. Caso se verifique este conjunto de coincidências, as ondas poderiam atingir locais situados à cota de + 25 metros (Dias *et al.*, 1994).

Assim propõe-se, a título preventivo, as seguintes zonas de risco (Dias *et al.*, 1994):

- ∴ Zona de risco muito elevado: abaixo da cota dos 5 metros;
- ∴ Zona de risco elevado: entre as cotas dos 5 e 10 metros;
- ∴ Zona de risco moderado: entre as cotas 10 e 25 metros.

A ondulação dominante na costa de Espinho, como referido anteriormente, tem origem no Atlântico Norte, com uma altura superior a 1 metro durante 95% do ano, podendo atingir ondas de 4 metros em 5% dos dias (Carvalho & Barcelô, 1966). É nos meses de Outono e Inverno que prevalecem alturas de ondas máximas de 8m a 11m e períodos de 8 segundos, o que representa uma tendência para a existência de uma forte erosão das praias de Espinho.

O litoral de Espinho tem sofrido, ao longo dos tempos, uma forte degradação. A elevação do nível do mar; a diminuição da quantidade de sedimentos fornecidos ao litoral; a degradação por parte de intervenção humana das estruturas naturais; e obras pesadas de engenharia costeira, são fenómenos que têm forte influência nessa deterioração. O turismo balnear, o avanço da urbanização, a construção de áreas industriais, a alteração dos planos de escorrência e a exploração de sedimentos, são os causadores dos fenómenos anteriormente referidos.



A ocorrência de temporais sobre o litoral de Espinho acarreta graves consequências, sobretudo, quando a capacidade de auto-recuperação das praias e dunas, após esses períodos se torna impossível, destruindo estas estruturas naturais de defesa costeira.

## 4.2. APLICAÇÃO DO MODELO SWAN AO CASO DE ESTUDO

### 4.2.1. DOMÍNIO DE CALCULO E MALHAS

Para obter uma representação real dos efeitos da batimetria sobre as características das ondas que se propagam desde o largo até próximo do litoral com o modelo SWAN é preciso aumentar a resolução espacial em direcção à costa, utilizando grelhas encaixadas com maior resolução quanto menor a profundidade. Através dos testes efectuados e uma vez comparados os resultados, optou-se por definir apenas uma malha,

Assim, o domínio de cálculo do modelo para o caso de estudo foi discretizado através de uma malha regular e rectangular, que cobre toda a região adjacente a Espinho (distância em linha recta da Póvoa de Varzim a Aveiro) até ao largo (ver Figura 4.3) (Sancho *et al.*, 2013).



Figura 4.3 - Domínio de cálculo do caso de estudo.

Com origem em  $X_0 = 463000$  m e  $Y_0 = 4487000$  m, representando uma extensão de 70 quilómetros perpendicular à linha da costa e de 100 quilómetros paralelo a esta e com uma resolução de 500 ( $\Delta x = 500$  metros,  $\Delta y = 500$  metros) (ver tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Características do domínio computacional da simulação.

Origem (km)	$X_0= 463.0$ ; $Y_0= 4487.0$
Dimensões (km)	$L_x=70$ ; $L_y=100$
Resolução (m)	$\Delta x= 500$ ; $\Delta y= 500$
Nº de pontos da malha	28000

Relativamente ao espaço espectral é utilizada a resolução *default* do SWAN aquando da presença de *swell*, com o valor de  $\Delta\theta = 4^\circ$ , cobrindo os  $360^\circ$  em direcção.

#### 4.2.2. BATIMETRIA E CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Os modelos numéricos de propagação de ondas necessitam da descrição do relevo submarino. Como a propagação se faz ao largo (grandes profundidades) até à costa, estão envolvidas grandes áreas que podem apresentar singularidades no seu interior.

A malha batimétrica foi fornecida ao modelo através de uma malha rectangular e com resolução regular. Elaborada recorrendo aos dados fornecidos pelo website <http://www.emodnet-hydrography.eu>, onde foram convertidos os dados de coordenadas geográficas (latitude – longitude) para coordenadas UTM (sistema de quadrículas). Esta conversão possibilitou assim, fornecer ao SWAN as informações referentes a batimetria da zona (ver Figura 4.4), uma vez que optou-se por utilizar coordenadas cartesianas.

A definição das condições de fronteira para caso de estudo resume-se aos parâmetros de agitação marítima que se atribuí às fronteiras Norte, Oeste e Sul do domínio de cálculo. A estas é atribuído um ficheiro *TPAR* que contém dados relativos a  $H_s$ ,  $D$  e  $T$ , fornecidos pela bóia ondógrafo, situada ao largo da Figueira da Foz. É a partir destes parâmetros que se força o modelo a simular as condições de agitação marítima ao largo de Espinho.

Como foi mencionado anteriormente, o período de tempo desta simulação é entre 1953 e 2009. Devido a este período de tempo ser muito grande e consequentemente a sua simulação, optou-se por dividir em décadas os dados:

- ∴ 1 de Janeiro de 1953 até 31 de Dezembro de 1962;
- ∴ 1 de Janeiro de 1963 até 31 de Dezembro de 1972;
- ∴ 1 de Janeiro de 1973 até 31 de Dezembro de 1982;
- ∴ 1 de Janeiro de 1983 até 31 de Dezembro de 1992;
- ∴ 1 de Janeiro de 1993 até 31 de Dezembro de 2002;



∴ 1 de Janeiro de 2003 até 31 de Março de 2009.

Deste modo, apesar de terem sido realizadas mais simulações, encurtou-se significativamente o tempo despendido pela computação, uma vez que foram utilizados 5 computadores. A título indicativo, refira-se que o cálculo para um período de 10 anos demorou 4 dias e 20 horas com um processador Intel(R) Core(TM) i7 CPU 870 @2.93GHz, com 6Gb de memória RAM.

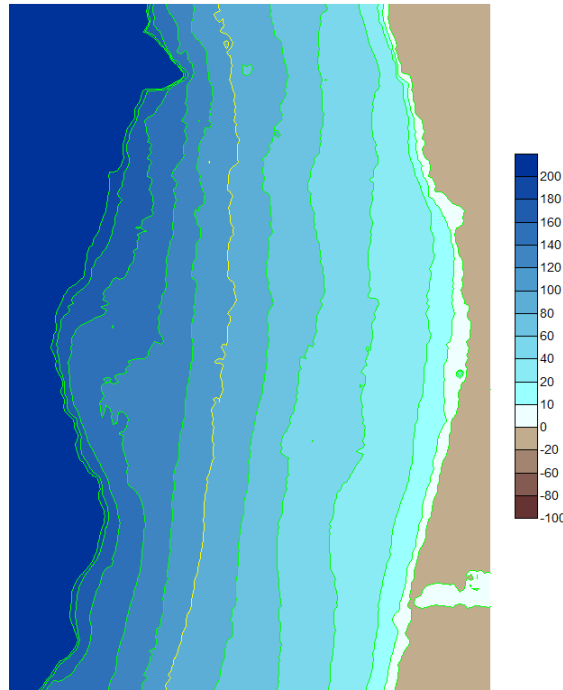


Figura 4.4 - Batimetria do domínio de cálculo.

As 26 localizações, próximas da batimetria dos 15 metros (Figura 4.5), foram definidas para a zona em frente à praia de Espinho, com um espaçamento de 500 metros entre si. O ponto situado mais a Sul é o  $P_1$ , com coordenadas  $x_1=524500$  m;  $y_1=4532700$  m, enquanto o ponto mais a Norte é o  $P_{26}$ , com coordenadas  $x_{26}=525400$  m;  $y_1=4545200$  m. Através da Tabela 4.2 é possível verificar as coordenadas e a batimetria exacta de cada localização utilizada na simulação.

Tabela 4.2 - Coordenadas e batimetria das 26 localizações.

Localização (n)	Xn (m)	Yn (m)	Batimetria (m)	Localização (n)	Xn (m)	Yn (m)	Batimetria (m)
1	524500	4532700	15.100	14	525400	4539200	14.899
2	524500	4533200	15.109	15	525300	4539700	14.817
3	524500	4533700	15.059	16	525300	4540200	15.257
4	524500	4534200	14.919	17	525500	4540700	14.956
5	524800	4534700	14.822	18	525500	4541200	14.960
6	525000	4535200	15.019	19	525500	4541700	15.001
7	525000	4535700	14.887	20	525300	4542200	14.951
8	524900	4536200	15.124	21	524900	4542700	15.194
9	524900	4536700	15.098	22	525000	4543200	15.004
10	525100	4537200	14.981	23	525200	4543700	15.108
11	525200	4537700	14.926	24	525200	4544200	14.943
12	525300	4538200	14.927	25	525300	4544700	15.154
13	525400	4538700	14.966	26	525400	4545200	14.875

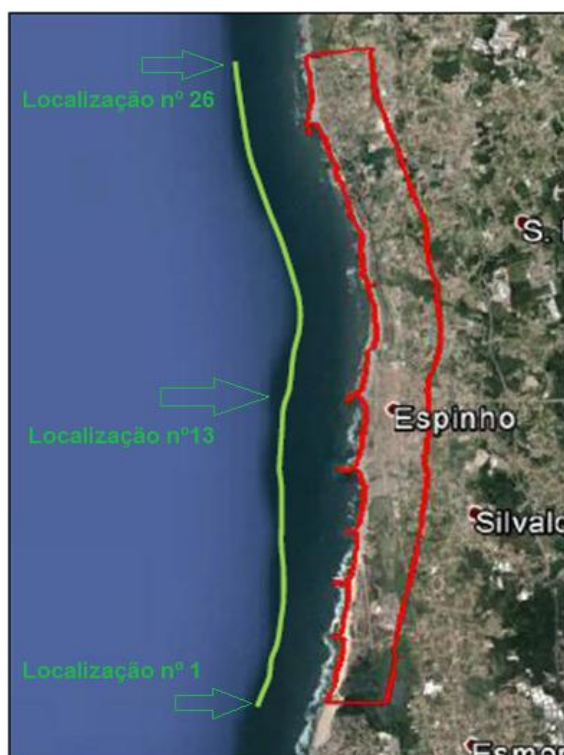


Figura 4.5 - Linha da batimétrica dos 15 metros ao longo do litoral de Espinho (Adaptação Google Earth).

#### 4.2.3. AGITAÇÃO MARÍTIMA

A determinação da agitação marítima de uma dada zona necessita a recolha e análise de dados referentes aos seus parâmetros, durante um período de tempo significativo. Para esta dissertação utilizaram-se dados fornecidos por Dodet *et al.* (2010) relativos ao período entre 1953 até 2009. Este período de tempo é amplo o suficiente para realizar um estudo deste género. Deste modo, utilizando os dados disponíveis, é possível, recorrendo ao modelo de previsão, caraterizar o clima de agitação marítima na costa de Espinho.

Com referido anteriormente, o valor mínimo de altura de onda significativa para se considerar período de tempestade, na costa Oeste portuguesa, é de 5 metros (referência IH). Porém,

uma vez que o valor mínimo de  $H_s$  para a costa Sul é de 3,0 metros, optou-se por utilizar o limiar de altura de onda significativa igual a 3 metros, para o presente estudo (ver também Sancho *et al.*, 2013). Esta decisão de diminuir o valor de  $H_s$ , veio aumentar significativamente o número total de tempestades.

Foram efectuadas três comparações relativamente aos dados resultantes da simulação na localização 13 ( $x_{13} = 525400$  m;  $y_{13} = 4538700$  m; batimétrica 14,966 m). Esta análise foi efectuada na localização mais central da totalidade de pontos definidos, ficando assim, com uma visão geral do que acontece nos restantes pontos. Essa comparação foi baseada no valor limite de altura de onda significativa para definir períodos de tempestade – 3, 4 e 5 metros.

Para um valor limite de 3 metros, a quantidade de tempestades observadas foi bastante maior que com os outros limites. Foram identificadas 649 tempestades no período de tempo do caso de estudo. Observando a Tabela 4.2, é possível diferenciar a distribuição desses temporais pelas classes definidas.

Tabela 4.3 - Distribuição das tempestades observadas pelas classes definidas para o limiar 3 metros.

Limiar 3			
Classes	E (m <sup>2</sup> h)	nº temporais / Classe	% temporais / Classe
Fraca	≤250	188	29%
Moderada	<500	168	26%
Significativa	<700	65	10%
Severa	<1200	95	15%
Extrema	>1201	133	20%
		649	100%

Tabela 4.4 - Distribuição de tempestades observadas pelas classes definidas para o limiar 4 metros.

Limiar 4			
Classes	E (m <sup>2</sup> h)	nº temporais / Classe	% temporais / Classe
Fraca	≤250	49	18%
Moderada	<500	68	25%
Significativa	<700	37	14%
Severa	<1200	50	18%
Extrema	>1201	68	25%
		272	100%

Tabela 4.5 - Distribuição de tempestades observadas pelas classes definidas para o limiar 5 metros.

Limiar 5			
Classes	E (m <sup>2</sup> h)	nº temporais / Classe	% temporais / Classe
Fraca	≤250	8	8%
Moderada	<500	30	31%
Significativa	<700	7	7%
Severa	<1200	26	27%
Extrema	>1201	25	26%
		96	100%

Aumentando o valor mínimo de  $H_s$  para 4,0 metros, é possível verificar através da Tabela 4.3 que, a quantidade de períodos de tempestade é menor, baixando para os 272 temporais. Este facto deve-se ao aumento do limiar de  $H_s$  que faz com que sejam identificados menos períodos de tempestade.

O limiar de 5 metros, valor admitido pelo IH para consideração de temporal na costa Oeste de Portugal, diminui muito as tempestades para o período de tempo analisado (96 tempestades).

Relativamente à distribuição por classes e comparando com os outros limiares analisados (ver Figura 4.5), é possível verificar que o limiar de 5 metros é bastante oscilante entre classes. Apesar de o limiar dos 4 metros ter identificado uma distribuição de tempestade por classes mais uniforme que as restantes, optou-se por definir o limiar dos 3,0 metros para o caso de estudo, uma vez que identificou mais períodos de tempestade, o que levou a definir de um modo mais consistente o clima de agitação marítimo no litoral de Espinho.

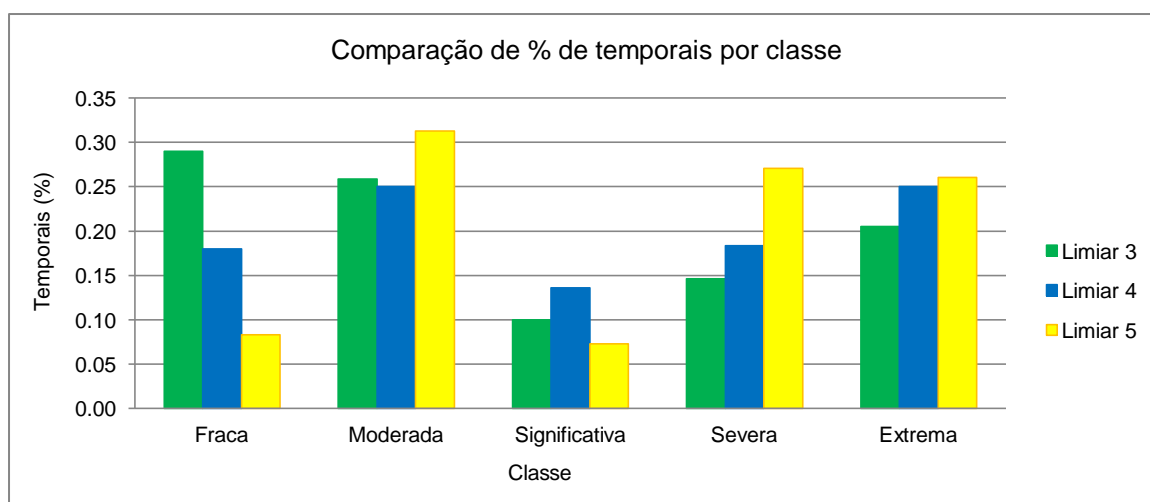


Figura 4.6 - Comparação entre os três limites da percentagem de temporais por Classe.

#### 4.2.4. CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES

A simulação para o caso de estudo realizada através do modelo SWAN (Anexo G), foi executado no modo não estacionário, sem considerar a interacção do vento. Foi utilizada, apenas uma malha como domínio de cálculo (ver capítulo 4.2.1).

Para a simulação foi utilizado o sistema de coordenadas cartesianas, de modo a definir as coordenadas do domínio de cálculo. Relativamente às direcções das ondas, houve a necessidade de converter as amplitudes fornecidas, de coordenadas esféricas para cartesianas. Porém, uma vez que o sistema mais utilizado nestes trabalhos são as coordenadas esféricas, teve de ser voltar a converter os resultados obtidos pelo SWAN, nesse tipo de coordenadas. É importante

referir que assumiu-se um nível de maré constante e igual ao nível médio anual, correspondendo à cota +2,0 metros em relação ao ZH.

Relativamente ao espectro direccional utilizado nas simulações, optou-se pelo *JONSWAP*. As fronteiras do domínio de cálculo foram forçadas, através de três ficheiros *TPAR*.

Foi utilizado a formulação *WestH* (Westhuysen *et al.*, 2007) para definição do *whitecapping*. Esta formulação combina o crescimento do *whitecapping* não linear com dados de ventos de Yan (1987). Para além da definição anterior, foram considerados os fenómenos de rebentação, atrito entre onda e fundo e as interações não lineares triplas. Estes fenómenos foram considerados, uma vez que o modo de geração escolhido – *GEN3* – não os considera.

Para o esquema numérico da simulação, foi utilizado o BSBT – *Backward Space, Backward Time* – uma vez que a simulação é não estacionária.

Foram definidas as coordenadas de 26 localizações para retirar os *output's* da simulação. Destes pontos, localizados à frente da costa de Espinho e próximos da batimétrica dos 15 metros, resultarão os valores relativos aos parâmetros da agitação marítima pretendidos.

Uma vez que foram divididos em seis partes os dados estimados para o período entre 1 de Janeiro de 1953 e 31 de Março de 2009, relativos aos parâmetros da agitação marítima, efectuaram-se seis simulações distintas onde apenas os ficheiros de entrada de dados (*TPAR*) era diferente.

### 4.3. RESULTADOS DA INTENSIDADE ENERGÉTICA E CLASSIFICAÇÃO DE TEMPESTADES

Para tratar os dados resultantes das simulações realizadas pelo SWAN, foi elaborado um código em *MATLAB*® (ANEXO H) que possibilita, de uma forma automática, quais os períodos de temporal para cada simulação. A definição de temporal utilizada neste código foi a mesma referida no capítulo 3.2. O valor admitido de *Hs* é superior a 3 metros, o período de tempo mínimo para ocorrência de tempestade é de 6 horas e para se considerar a mesma tempestade, não pode haver um intervalo de tempo superior a 48 horas entre duas ocorrências. A partir dos resultados provenientes da execução desse código, fez-se uma análise para cada localização e para cada tempestade, dos valores referentes à intensidade energética média, altura de onda máxima, período de pico máximo e direcção média.

Analisando os gráficos apresentados no ANEXO I, é possível observar os valores de *Hs*, *Tp* máximos e *D* ao longo dos 56 anos, para três pontos distintos – localização nº1 (mais a Sul); localização nº13 (central) e localização nº26 (mais a Norte). Foram registados para a primeira localização 669 períodos de temporal, para a segunda localização 649 tempestades e para a localização mais a Norte, 721 temporais. Através da tabela 4.6, é possível observar os valores máximos da intensidade energética, as durações máximas do período de tempestade, as máxi-

mas alturas de onda significativas e períodos de picos, para o período de 56 anos do caso de estudo, nas 3 localizações (nº1, nº13 e nº26). Como se pode observar, a localização com maior intensidade energética é a 26, seguida da 1, o mesmo ocorrendo com a duração máxima do temporal e com o máximo valor do período de pico. No entanto, o valor máximo da altura de onda significativa é superior no ponto 1, embora não difira significativamente entre os três pontos analisados.

Tabela 4.6 - Valores máximos de Intensidade energética, duração de tempestade, altura de onda significativa e período de pico – Localizações nº1, nº13 e nº26.

Localização nº1			
Máx_E (m <sup>2</sup> .h)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
8340.50	438	7.47	15.29
Localização 13			
Máx_E (m <sup>2</sup> .h)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
7496.99	348	7.30	15.23
Localização 26			
Máx_E (m <sup>2</sup> .h)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
8699.27	450	7.43	15.67

Para o gráfico de altura de onda significativa máxima verifica-se que:

- ∴ localização nº1: o valor máximo de  $H_s$  foi observado no temporal que ocorreu no dia 14 de janeiro de 1973, com o valor de 7,47 metros. A intensidade energética desse temporal chegou aos 3777,63 m<sup>2</sup> h e teve uma duração de 162 horas (aproximadamente 7 dias);
- ∴ localização nº13: o valor máximo de  $H_s$  observado é de 7,30 metros, relativo ao mesmo temporal observado na localização nº1 (14 de Janeiro de 1973), com 3575,69 m<sup>2</sup> h de intensidade energética e duração total de 162 horas.
- ∴ localização nº26: no mesmo dia 14 de janeiro de 1973, observou-se o valor máximo de  $H_s$ , 7,43 metros. Para esta localização, registou-se uma intensidade energética de 3988,72 m<sup>2</sup> h e duração da tempestade de 168 horas.

Comparando as três localizações, verifica-se que o valor máximo de  $H_s$  ocorreu no mesmo temporal, porém foram observados valores de intensidade energética distintos.

Através do gráfico de período de pico, observa-se que:

- ∴ localização nº 1: o valor máximo do  $T_p$  foi de 15,29 s, registado no temporal ocorrido no dia 11 de Março de 1969, com 3442, 91 m<sup>2</sup> h de intensidade energética e duração de 198 horas, aproximadamente 8 dias e meio.
- ∴ localização nº13: os registos estão entre os 8,46 s e os 15,23 s. O valor máximo de  $T_p$  foi observado no temporal de 11 de Março de 1969, com 2960,69 m<sup>2</sup> h de  $E$  e duração de 186 horas (quase 8 dias)

∴ localização nº 26: o período de pico máximo foi de 15,67 segundos, observado no temporal de 1 de Janeiro de 1955, com uma duração de apenas 24 horas e uma intensidade energética de 279,45 m<sup>2</sup> h. Porém o valor do período para o temporal de 11 de Março de 1969 foi de 15,25 s.

Por último, para o gráfico dos rumos médios observados em cada temporal, verifica-se que:

- ∴ localização nº1: os rumos das ondas estão compreendidos entre os 238,9° e os 310, 9°;
- ∴ localização nº13: as direções estão entre as amplitudes dos 240,7° e os 307,0°.
- ∴ localização nº26: as direções das ondas estão compreendidas entre os 237,7° e os 310,1°.

Em conclusão, os rumos observados nas três localizações são muito próximos e provenientes entre NW e SW, ou seja, dos 2º e 3º quadrantes.

Através da Figura 4.7 e Figura 4.8 é possível observar as médias da intensidade energética distribuídas ao longo da faixa costeira do litoral de Espinho. Como referido anteriormente, o ponto nº 1 é o mais a Sul, enquanto o nº26 está situado mais a Norte. É visível que, tanto a Norte como a Sul, os valores de E são superiores comparativamente aos valores nas localizações mais centrais (pontos 19 a 26) da área de estudo. A zona Norte (pontos 19 a 26) é a zona mais energética de toda a zona de estudo. Este facto deverá ser, provavelmente, devido a refacções distintas da agitação marítima.

Os valores médios da intensidade energética estão compreendidos entre os 845,10 m<sup>2</sup> h (valor mínimo observado), observado na localização nº10 e os 985,14 m<sup>2</sup> h na localização nº24 (valor máximo). A média total da intensidade energética nas 26 localizações toma o valor de 896,54 m<sup>2</sup> h.

Relativamente à média do período de pico máximo nas 26 localizações ao longo do litoral de Espinho é possível observar (através da Figura 4.9) que, o valor mínimo verificou-se no ponto nº10 com o valor de 11,37 s e o máximo na localização nº24, 11,64 s. De igual forma, comparativamente ao gráfico anterior (Figura 4.8), a zona com valores mais elevados de  $T_p$  é a Norte (a partir da localização nº20), sendo que nos restantes pontos o valor do período de pico toma valores mais uniformes, na ordem dos 11,42 s.



Figura 4.7 - Intensidade Energética média ao longo do litoral de Espinho.

A partir da Figura 4.10 é possível comparar os valores registados, durante os temporais, da média da altura de onda significativa máxima,  $Hs_{m\acute{a}x}$ , e da altura de onda significativa média,  $Hs_{m\acute{e}d}$ , ao longo das 26 localizações. Neste gráfico, tal como anteriormente, observam-se valores mais altos de  $Hs_{m\acute{a}x}$  e  $Hs_{m\acute{e}d}$  nas localizações mais a Norte. Relativamente a  $Hs_{m\acute{a}x}$ , os valores estão compreendidos entre os 3,93 m na localização nº10 (mínimo registado) e 4,10 m na localização nº24. Os valores de  $Hs_{m\acute{e}d}$  têm o mínimo na localização nº10 (3,51 m) e o máximo no ponto 24 (3,60 m).



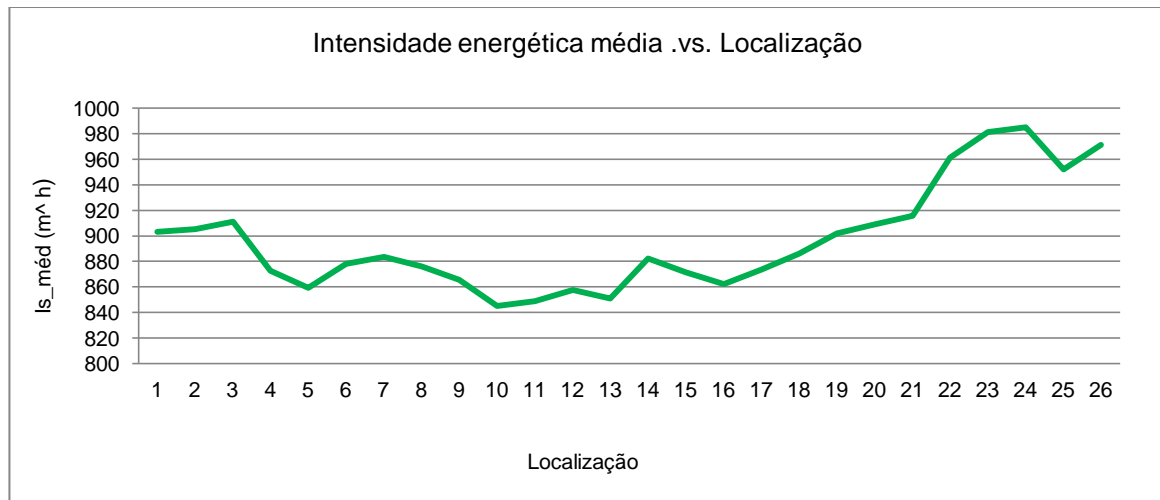


Figura 4.8 - Intensidade Energética média em cada localização.

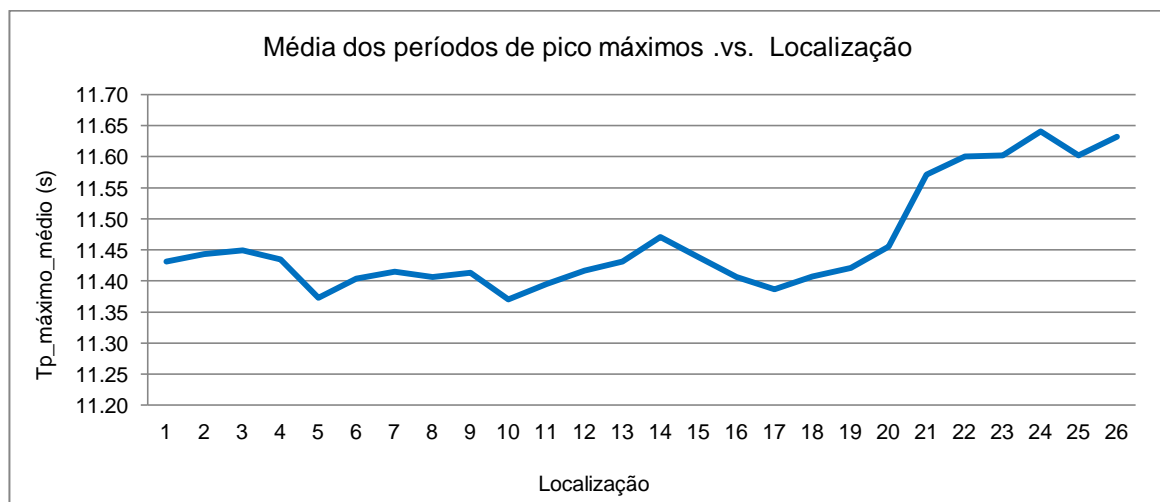


Figura 4.9 - Média do Período de pico máximo em cada localização.

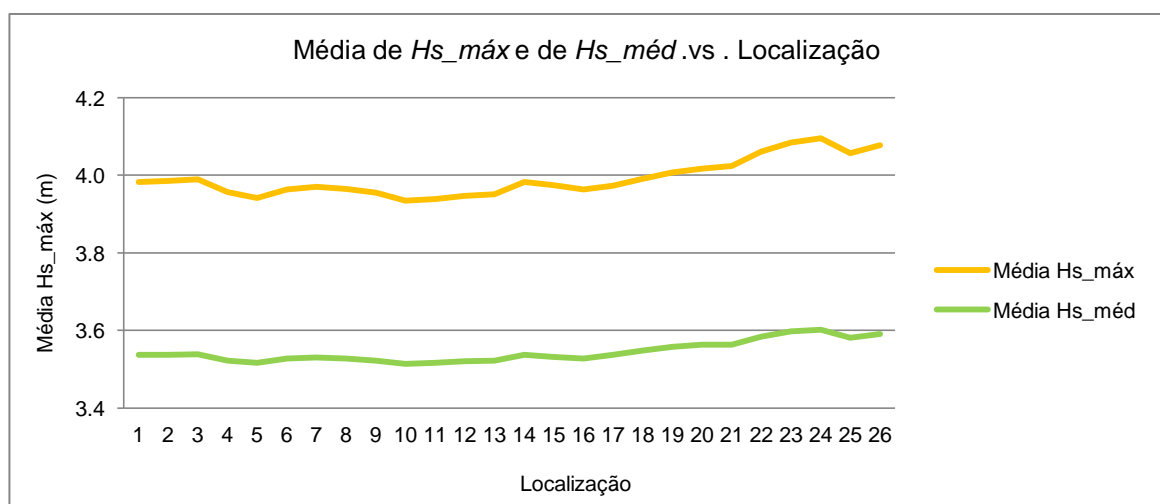


Figura 4.10 - Média de  $Hs_{máx}$  e de  $Hs_{méd}$  em cada localização.

A partir dos gráficos das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, conclui-se que são as localizações nº 10 e nº 24 que registam os valores mínimos e máximos, respectivamente, das médias da intensidade energética, período de pico médio e a média das alturas de onda significativas máximas e médias. Na Tabela 4.7, são apresentados os valores máximos da intensidade energética, duração de período de tempestade, altura de onda significativa máxima e período de pico máximo, ao longo dos 56 anos do caso de estudo, referentes às localizações nº10 e nº24 que apresentaram os valores médios, mínimos e máximos, respectivamente, nos gráficos anteriores.

Tabela 4.7 - Valores máximos de intensidade energética, duração de período de tempestade, altura de onda máxima e período de pico máximo - Localizações nº10 e nº24.

Localização nº10			
Máx_E (m <sup>2</sup> .h)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
7723.13	348	7.34	15.24
Localização nº24			
Máx_E (m <sup>2</sup> .h)	Máx_Dur (h)	Máx_Hs (m)	Máx_Tp (s)
8756.98	450	7.43	15.66

A Figura 4.11 mostra o gráfico das direcções máximas, médias e mínimas das ondas em cada localização da zona de estudo. Relativamente aos rumos máximos observados, obtiveram-se amplitudes entre os 302,2° e os 296,7°, sendo que, foi na localização nº4 que se verificou o rumo máximo de onda. Quanto à média das direcções de onda, não se verificou uma grande variação, sendo que os valores verificados são entre 291,7° e 287,6°, ponto 4 e 14, respectivamente, diferindo apenas de 4,1°. Por último, as direcções mínimas observadas variaram entre os 277,6° na localização nº19 e os 281,2° na localização nº4. Todas estas direcções são provenientes de NW que, como foi indicado anteriormente (capítulo 2.2), são os rumos que mais vezes são observados e que estão directamente relacionados com a presença do Anticiclone dos Açores e da depressão a Norte da Península Ibérica.

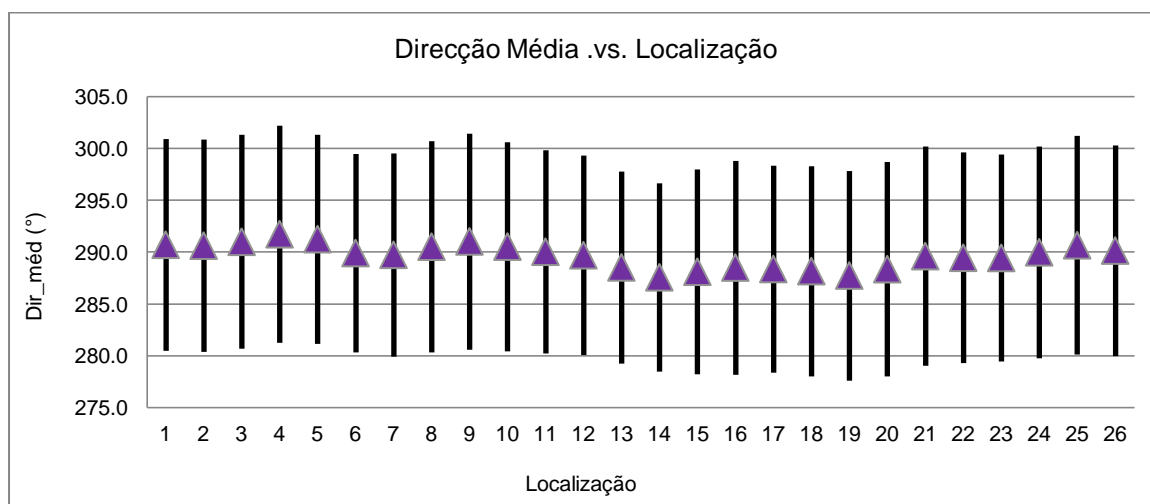


Figura 4.11 - Máximo, média e mínimo das direcções de onda em cada localização.

Tabela 4.8 - Localizações, intensidade energética média, distribuição de tempestades por Classes (em %) e nº de tempestades por ano.

Localização	Is_méd (m <sup>2</sup> h)	Classes de Tempestade					nº Tempestades/Ano
		Fraca	Moderada	Significativa	Severa	Extrema	
1	903.252	0.278	0.260	0.109	0.152	0.200	11.95
2	905.141	0.277	0.260	0.108	0.154	0.202	11.95
3	911.075	0.277	0.255	0.112	0.155	0.201	11.98
4	872.555	0.301	0.244	0.104	0.152	0.199	12.00
5	859.385	0.296	0.261	0.090	0.158	0.195	11.84
6	878.122	0.293	0.249	0.106	0.151	0.201	11.93
7	883.557	0.292	0.250	0.104	0.151	0.203	11.98
8	875.992	0.283	0.261	0.102	0.154	0.199	11.91
9	865.753	0.288	0.261	0.094	0.155	0.202	11.84
10	845.099	0.307	0.249	0.092	0.154	0.198	11.70
11	848.859	0.294	0.256	0.098	0.150	0.202	11.79
12	857.656	0.291	0.258	0.098	0.148	0.205	11.68
13	850.784	0.290	0.259	0.100	0.146	0.205	11.59
14	882.243	0.286	0.262	0.096	0.152	0.205	11.88
15	871.388	0.287	0.264	0.098	0.149	0.203	11.89
16	862.403	0.295	0.253	0.096	0.151	0.204	11.91
17	873.402	0.295	0.253	0.093	0.156	0.203	12.13
18	886.013	0.284	0.263	0.096	0.149	0.208	12.21
19	901.866	0.275	0.265	0.095	0.154	0.210	12.39
20	908.871	0.272	0.262	0.100	0.157	0.209	12.54
21	915.832	0.278	0.256	0.103	0.156	0.207	12.79
22	961.074	0.257	0.260	0.112	0.152	0.218	13.25
23	981.326	0.246	0.257	0.118	0.155	0.224	13.29
24	985.139	0.249	0.249	0.122	0.159	0.221	13.34
25	951.876	0.259	0.261	0.116	0.151	0.213	12.75
26	971.239	0.248	0.252	0.128	0.154	0.218	12.88

A Tabela 4.8 mostra os valores médios da intensidade energética correspondentes a cada localização, para o período de 56 anos considerado no caso de estudo. Como já foi analisado pela Figura 4.8, os valores de E são mais elevados nas localizações mais a Norte e Sul, enquanto as localizações mais centrais têm valores menores. Desta análise conclui-se que a zona Norte de Espinho é atingida por temporais mais enérgicos comparativamente aos pontos mais centrais e a Sul.

A partir da mesma tabela e do gráfico da Figura 4.12, é possível verificar o valor médio de eventos que ocorrem por ano: 11,59 temporais/ano para a localização nº13 (ponto mais central) e 13,34 temporais/ano registados no ponto 24. Uma vez mais, foram observados mais temporais/ano nas localizações mais a Norte em comparação com os restantes pontos. A média anual de temporais para as 26 localizações é de 12,21 temporais.

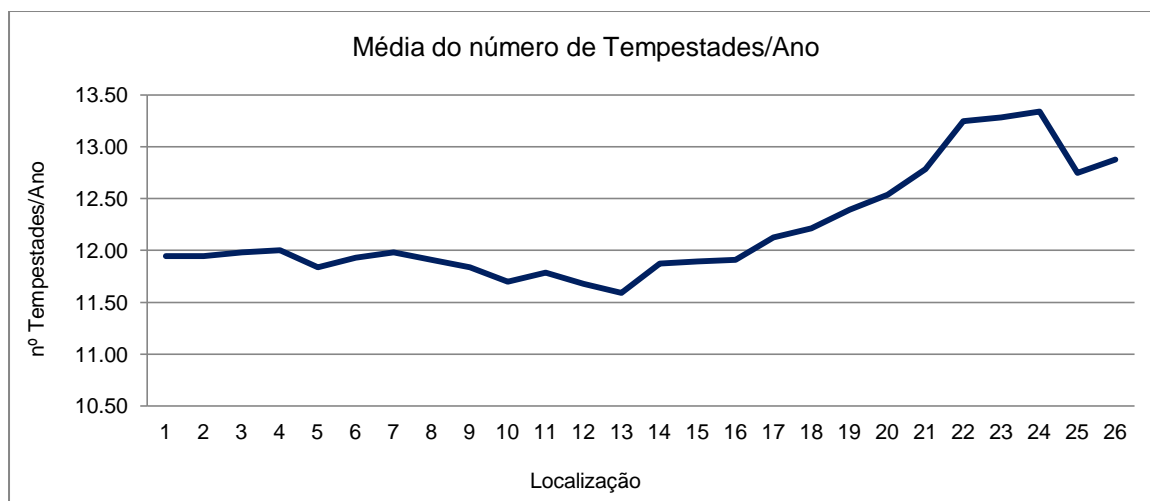


Figura 4.12 - Número de tempestades anuais por localização.

Para além da intensidade energética média e do número de temporais/ano, a Tabela 4.8 apresenta a percentagem de temporais por Classe de Tempestade. Analisando juntamente a Tabela 4.8 e a Figura 4.13, é possível observar a percentagem de eventos que ocorreram nas 26 localizações e correspondente Classe desse evento. A classe de tempestades Fraca é a que obtém maior percentagem de eventos (média de 28,1%), à excepção das localizações mais a Norte em que a classe Moderada alcança valores mais elevados, porém muito aproximados. Logo a seguir à classe Fraca surge a classe Moderada, com registos médios na ordem dos 25,7%. A classe mais enérgica – Extrema – surge como a terceira classe com maior percentagem de temporais, com uma média de 20,6%. Esta classe regista maior percentagem de ocorrências a Norte comparativamente às restantes localizações. A classe Severa foi a que registou uma maior uniformidade na percentagem de temporais, com valores máximos e mínimos de 15,9% e 14,6%, respectivamente e média de 15,3%. Por último, surge a classe Significativa onde foram observadas percentagens de ocorrência de temporais máximas de 12,8%, mínimas de 9% e média foi de 10,3%.

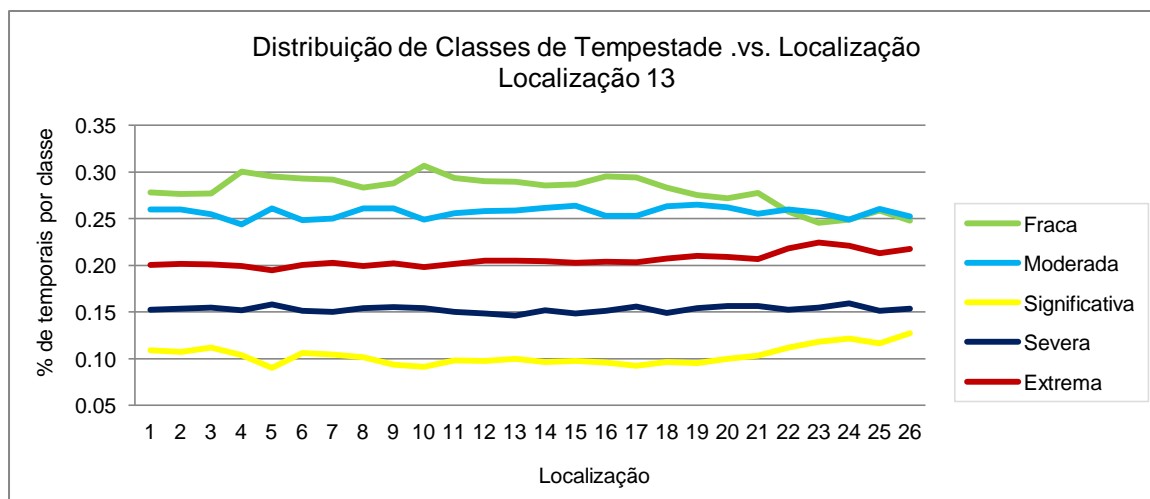


Figura 4.13 - Distribuição das classes por duração de tempestade (localização 13).

Como é possível observar através da Figura 4.14, a relação da altura de onda significativa máxima e a duração de cada evento está diretamente relacionada com a classificação de intensidade energética utilizada. Através desta figura é fácil verificar que para eventos de menor duração obtém-se um intervalo de valores de  $Hs\_máx$  mais pequeno, comparativamente a períodos de tempestade de maior duração que contempla intervalos de  $Hs\_máx$  maiores.

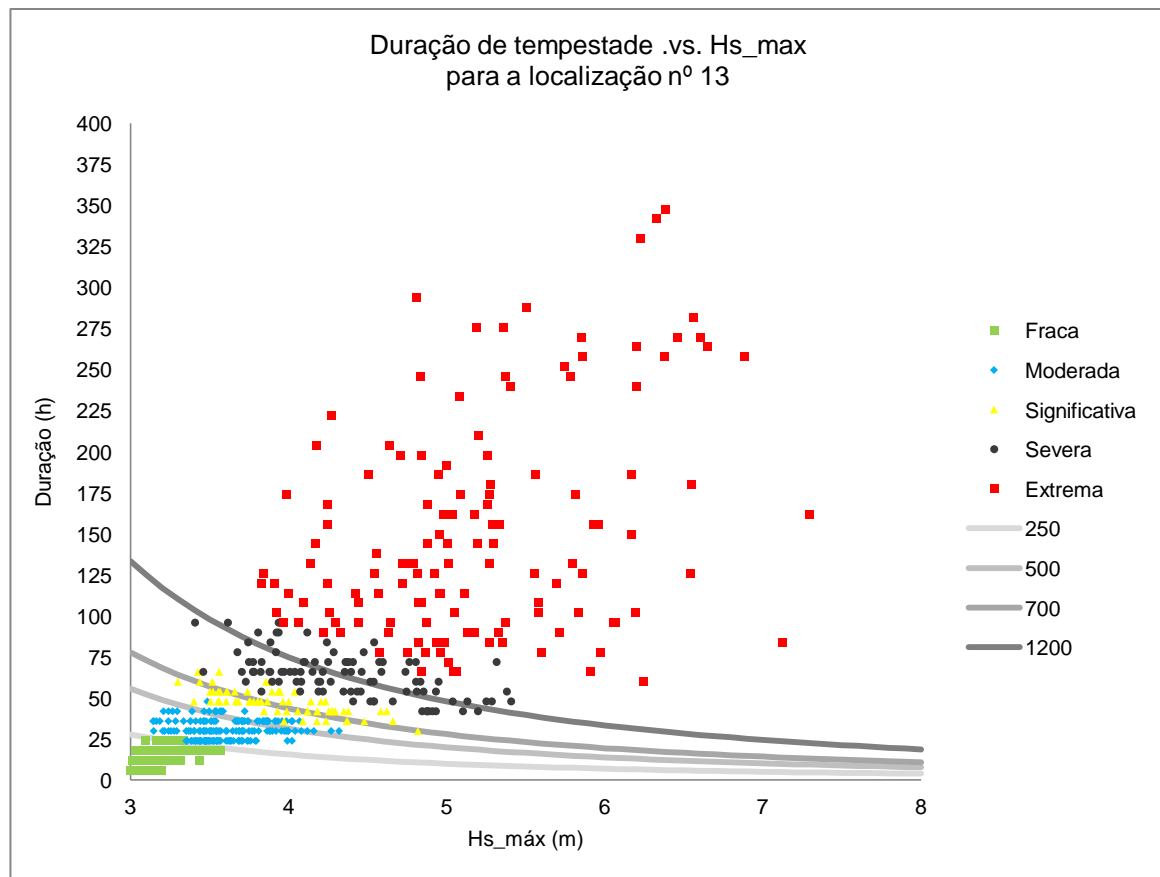


Figura 4.14 - Altura de onda significativa máxima e duração de período de tempestade por Classe de Tempestade.

Esta distribuição, dividida pelos valores limite utilizados na classificação de tempestades mostra que, para a localização mais central (ponto nº13), as ocorrências abaixo da linha dos 250  $m^2 h$  (Classe Fraca) indicam que as durações dos temporais (188 eventos) não excedem as 24 horas e os 3,57 m de altura de onda significativa máxima. Para a Classe Moderada (valores entre os 251 e os 500  $m^2 h$ , com 64 registos de temporal), as ocorrências mantêm-se bastante agrupadas, com valores de  $Hs\_máx$  entre os 3,15 m e os 4,82 m e as durações entre as 30 horas e as 66 horas. A Classe Significativa, intervalo de E entre os 501 e os 700  $m^2 h$ , registou 64 ocorrências, com valores de  $Hs\_máx$  entre 3,31 m e 4,82 m e duração máxima de 66 horas (aproximadamente 3 dias). Para a Classe Severa (entre 701 e 1200  $m^2 h$ ), foram observados 95 períodos de tempestade, dos quais foram registados valores de  $Hs\_máx$  entre os 5,51 m e os 3,41 m e durações entre 96 e 42 horas. Por último, a Classe Extrema é a que apresenta registos mais dispersos. Com um total de 133 ocorrências, observaram-se valores de  $Hs\_máx$  intervalados entre os 7,30 m e 3,83 m e durações entre 60 a 348 horas (quase 15 dias de temporal).

O gráfico da Figura 4.14 apresenta as linhas de classe de intensidade ( $E=250, 500, 700$  e  $1200 \text{ m}^2 \text{ h}$ ). Estas linhas representam os limites superiores de cada uma das classes de tempestade anteriormente definidas. A título de exemplo, nenhum evento de uma determinada classe poderia ultrapassar a linha correspondente da sua classe. Porém, uma vez que estas linhas são definidas a partir do desenvolvimento da equação 3.1 (Capítulo 3.2):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} Hs^2 dt \Leftrightarrow E = (t_2 - t_1) \times Hs^2 \Leftrightarrow (t_2 - t_1) = \frac{E}{Hs^2} \quad (4.1)$$

a razão pela qual existem eventos que ultrapassam o respectivo limite deve-se ao facto de, nesta equação, os valores de  $Hs$  utilizados são os valores máximos de períodos de tempestade em cada evento e não os valores reais de  $Hs$  ocorridos ao longo de cada evento, utilizados na equação 3.1.

A partir da Figura 4.15, é possível observar as durações de períodos de tempestade médios e máximos relativos a cada localização. Uma vez mais, é notório que as localizações a Norte têm eventos com maior duração comparativamente aos pontos mais a sul. A duração média máxima foi observada na localização nº23, com duração de 61,83 horas, enquanto a duração média mínima foi observada no ponto 10, com valor de 56,75 horas. Quanto aos valores máximos e mínimos observados, ocorreram eventos com duração máxima de 450 horas, aproximadamente 19 dias de tempestade nas localizações nºs 24 e 26 e mínimos de 6 horas em todas as localizações.

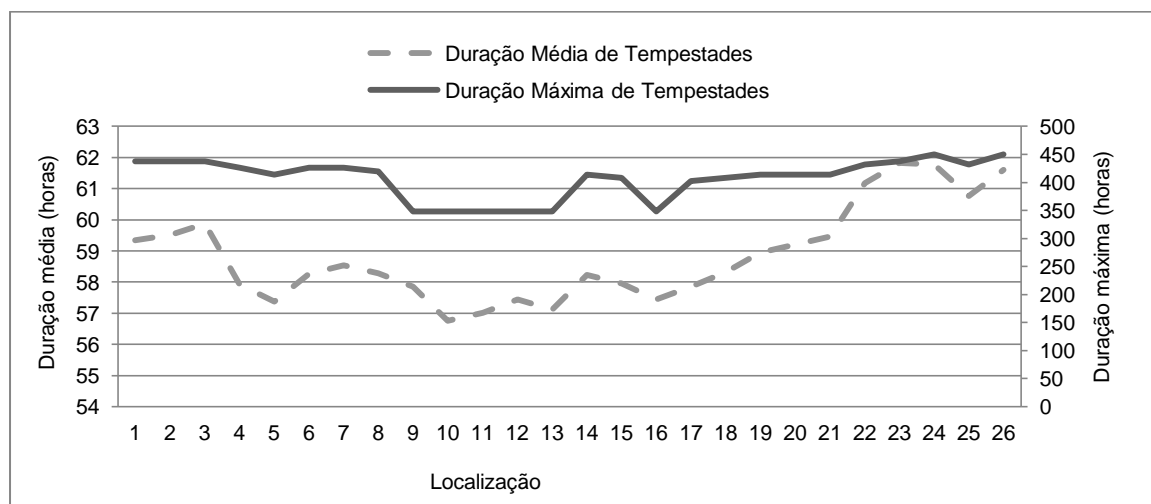


Figura 4.15 - Durações médias e máximas de períodos de tempestade em cada localização.

O gráfico da Figura 4.16, mostra a dispersão entre a intensidade energética e a altura de onda significativa máxima por período de tempestade, para a localização nº13. É possível observar que existe uma correlação positiva entre as duas variáveis, embora se observe também que, os valores mais elevados de  $E$  não coincidem necessariamente com os maiores valores de  $Hs_{máx}$ . O valor mais alto de intensidade energética registado foi de  $7496,99 \text{ m}^2 \text{ h}$ , correspondente a uma altura de onda máxima de  $6,38 \text{ m}$ , no temporal de 13 de Dezembro de 1989. Por

outro lado, o maior valor de  $Hs\_máx$  registrado foi de 7,30 m, com uma intensidade energética de 3573,69 m<sup>2</sup> h, no temporal de 14 de Janeiro de 1973.

Na Figura 4.17, apresenta-se um gráfico com uma distribuição idêntica à Figura 4.16, mas para as variáveis  $Hs\_máx$  e duração de período de tempestade ( $t_2-t_1$ ), para a localização nº13. Neste caso, existe também, uma correlação positiva entre ambos os pares de valores, mas de igual modo que o gráfico anterior, os temporais mais longos registrados não têm associados valores de  $Hs\_máx$  maiores. O temporal de maior duração (13 de Dezembro de 1989) decorreu durante 348 horas (quase 15 dias de duração) e teve um  $Hs\_máx$  igual a 6,38 m, enquanto o máximo de  $Hs\_máx$  observado foi de 7,30 m no temporal de Janeiro de 1973, com uma duração total de 162 horas (quase 7 dias).

De igual ao modo aos gráficos anteriores a Figura 4.18 apresenta, também, uma correlação positiva entre duração de temporal e intensidade energética. Porém, esta relação entre estas duas variáveis difere dos 2 gráficos anteriormente referidos (Figura 4.16 e 4.17). Esta dispersão mostra que a maior parte dos eventos de maior duração correspondem aos maiores valores de  $E$ . A partir da análise da figura verifica-se que o valor máximo de  $E$  registrado (7496,99 m<sup>2</sup> h) corresponde ao temporal de maior duração (348 horas).

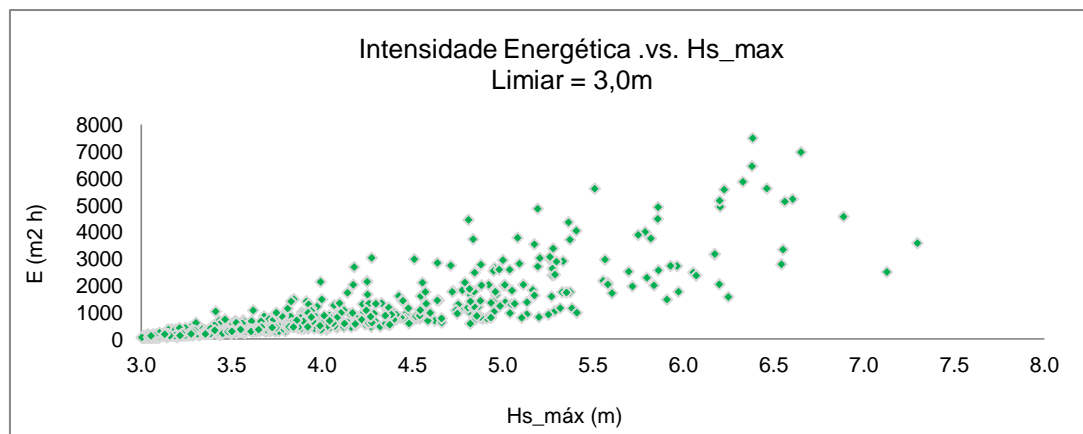


Figura 4.16 - Distribuição de  $Hs\_máx$  por Intensidade Energética (localização 13).

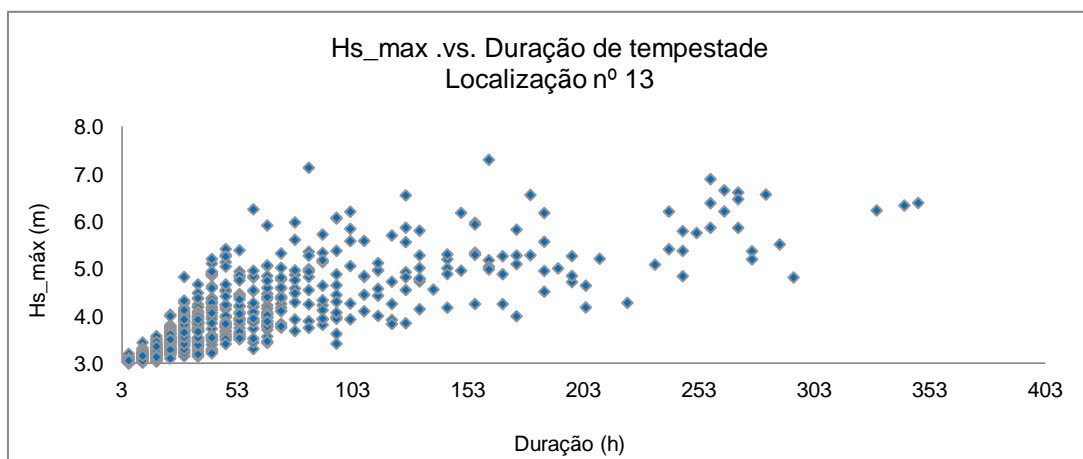


Figura 4.17 - Distribuição de  $Hs\_máx$  por duração de tempestade (localização 13).

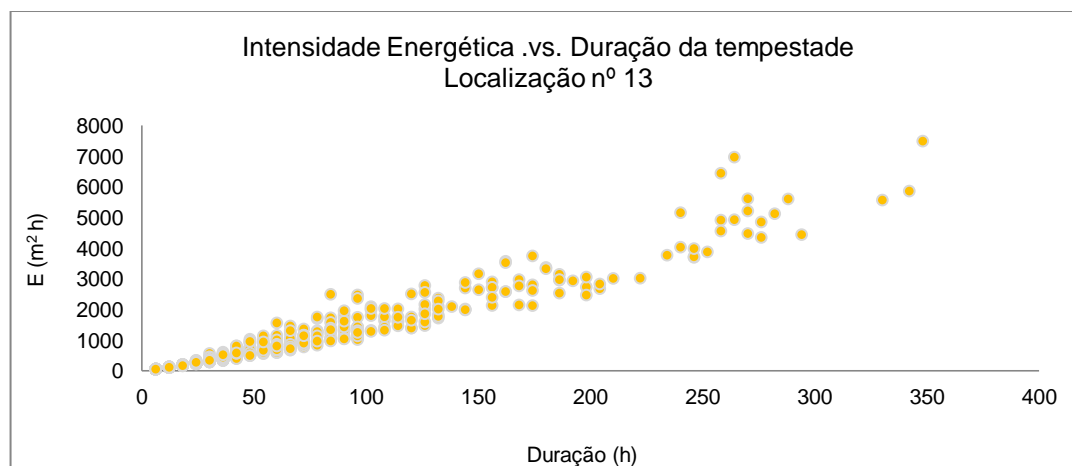


Figura 4.18 - Distribuição da intensidade energética por duração de tempestade (localização 13).

#### 4.4. DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Para se chegar a uma classificação de períodos de tempestade, baseada na intensidade energética, utilizaram-se os valores resultantes das simulações efectuadas pelo modelo, de modo a analisar e quantificar o número de tempestades ocorridas nos 56 anos. Uma vez mais, optou-se pela localização mais central das definidas.

Na secção anterior utilizou-se a classificação de *Mendoza e Jimenez* (2011), proposta para o litoral da Catalunha, que é muito menos energético que o litoral de Espinho. Assim, com os mesmos dados, foram testadas outras duas classificações de temporais baseadas em intervalos distintos da intensidade energética (Tabela 4.9). As três classificações identificaram a mesma quantidade de temporais, no entanto, a grande diferença é a distribuição dessas tempestades por classes.

Da primeira classificação, baseada em *Mendoza e Jimenez* (2011) e anteriormente seguida (secção 4.3), observa-se que as classes Fraca, Moderada e Extrema são as que englobam mais períodos de tempestade, 29,0%, 25,9% e 20,5% (coluna 4 da Tabela 4.9), respectivamente. Por outro lado, as classes Significativa (65 tempestades) e Severa (95 tempestades) abrangem menos períodos de tempestade (coluna 3 da Tabela 4.9). Através desta classificação verifica-se que as classes menos energéticas são as mais habituais, com possibilidade de ocorrência na ordem dos 3 temporais/ano (coluna 5 da Tabela 4.9).

Aumentando os valores da intensidade energética das classes Significativa, Severa e Extrema, obteve-se a segunda classificação. As percentagens de temporais das classes menos enérgicas mantiveram-se iguais, no entanto, aumentando o intervalo da classe Significativa, foram abrangidos mais tempestades em detrimento da classe Severa. A classe para valores de intensidade energética superiores a  $1500 \text{ m}^2 \text{ h}$  (classe Extrema), diminuiu comparativamente à classificação anterior. É possível verificar que com esta nova (segunda) classificação a classe Severa é a que contabiliza menos temporais por ano.



Tabela 4.9 - Três classificações de períodos de tempestade.

Classes	E (m <sup>2</sup> h)	nº temporais / Classe	% temporais / Classe	Temporais / ano	Temporais / 10 anos
Fraca	≤250	188	29%	3	34
Moderada	<500	168	26%	3	30
Significativa	<700	65	10%	1	12
Severa	<1200	95	15%	2	17
Extrema	>1201	133	20%	2	24
		649	100%	12	116

Classes	E (m <sup>2</sup> h)	nº temporais / Classe	% temporais / Classe	Temporais / ano	Temporais / 10 anos
Fraca	≤250	188	29%	3	34
Moderada	<500	168	26%	3	30
Significativa	<1000	136	21%	2	24
Severa	<1500	55	8%	1	10
Extrema	>1500	102	16%	2	18
		649	100%	12	116

Classes	E (m <sup>2</sup> h)	nº temporais / Classe	% temporais / Classe	Temporais / ano	Temporais / 10 anos
Fraca	≤250	188	29%	3	34
Moderada	<500	168	26%	3	30
Significativa	<1000	136	21%	2	24
Severa	<2000	82	13%	1	15
Extrema	>2000	75	12%	1	13
		649	100%	12	116

O aumento do intervalo dos valores de  $E$  na classe Severa e, por sua vez, o aumento do limiar para a definição da classe Extrema, deu origem à nova (terceira) classificação proposta na Tabela 4.9. Analisando os dados, verificou-se que, com esta nova definição, aumentaram os períodos de tempestades para a classe Severa e diminuiram os temporais na classe Extrema, mas com valores muito aproximados.

A partir do gráfico da Figura 4.19 é possível verificar as percentagens de ocorrência de eventos de temporal para as 3 classificações analisadas anteriormente e consequentes classes de tempestade. As três classificações testadas têm a particularidade de ter valores de  $E$  iguais para as classes Fraca e Moderada o que resulta, naturalmente, na mesma percentagem de ocorrência. Porém, a classificação de *Mendoza e Jimenez* (2011) utiliza, para a classe Significativa, como valor limite de intensidade energética 700 m<sup>2</sup> h, valor inferior ao das restantes duas classificações (2 e 3). Este facto faz com que se observem menos eventos desta classe nesta classificação. As duas classes mais energéticas (Severa e Extrema) são as que apresentam percentagens de ocorrência de temporais distintos nas três classificações comparadas. Para a classificação nº1 (Classe Severa e Extrema), uma vez que o valor de  $E$  é inferior ao das restantes, obtém-se maior número de eventos. A classificação nº2 é a que apresenta menor registo de eventos na classe Severa, porém na classe Extrema, apresenta um acréscimo de ocorrências, registando percentagens superiores à terceira classificação.

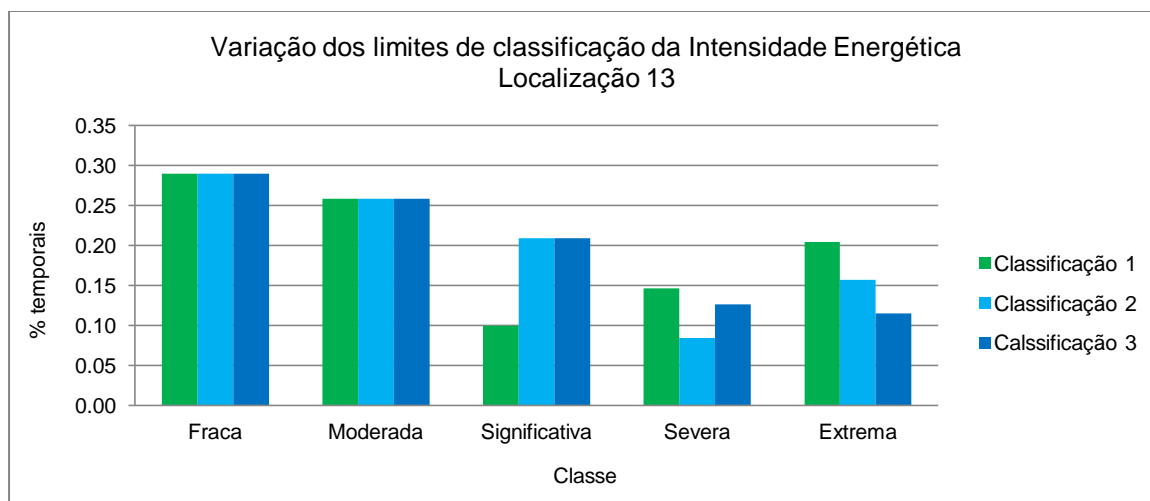


Figura 4.19 - Comparação de 3 classificações de Intensidade Energética (Localização 13).

Em conclusão, a classificação 3 aparenta ser a mais consistente em termos de decréscimo gradual do número de temporais com o aumento da classe de temporal, comparativamente com as restantes. Este facto deve-se ao aumento significativo do limite de intensidade energética imposto ( $E > 2000 \text{ m}^2 \text{ h}$ ) proposto para a classe Extrema. No entanto, esta nova proposta de classificação energética carece de validação com um maior conjunto de dados.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A fim de obter valores que permitam analisar o risco potencial de determinada zona costeira à acção de temporais, Mendoza *et al.* (2011) sugerem o cálculo de um parâmetro, a intensidade energética de cada temporal, que dá informação da energia contida em cada temporal. Assim, o principal objectivo da presente dissertação é conhecer a intensidade energética de um troço da costa continental portuguesa, ao longo do litoral de Espinho, de forma a permitir informar indicadores de risco à acção marítima (e.g., Coelho *et al.*, 2006). Para tal, utilizou-se o modelo numérico SWAN, que permite, com base em dados de agitação medidos ao largo, estimar as características da agitação marítima e a respectiva intensidade energética numa zona mais próxima da costa.

Recorrendo ao modelo numérico, simulou-se o clima de agitação marítima junto à costa de Espinho a partir de valores estimados ao largo da Figueira da Foz, entre o período entre 1 de Janeiro de 1953 e 31 de Março de 2009. Resultante das simulações, obtiveram-se os parâmetros para definir a intensidade energética em período de temporal, em 26 localizações consideradas ao longo de 12,5 km, sobre a batimétrica dos -15 m (ZH).

A aplicação do modelo iniciou-se com uma série de testes para verificar a sensibilidade dos resultados do modelo a diversos parâmetros de entrada. Os testes de sensibilidade efectuados serviram, numa primeira fase, para seleccionar os valores dos parâmetros a utilizar no modelo.

Os resultados das simulações efectuadas pelo SWAN junto à costa de Espinho permitiram verificar que:

- ∴ os valores de intensidade energética médios situaram-se entre os 981 m<sup>2</sup> h e os 845 m<sup>2</sup> h, sendo que, em direcção a Norte, obtiveram-se os valores mais elevados de  $E$ ;
- ∴ as direcções médias de cada tempestade observada no período de estudo coincidiam na maior parte das observações realizadas, correspondendo à direcção de incidência de Noroeste e que o intervalo de valores relativos aos rumos de ondas em períodos de tempestade foi entre os 302,2° e 277,6° (rumos náuticos), sendo que o valor médio dos rumos médios em cada localização fixou-se entre os 291,7° e os 286,6° (próximo de NW);
- ∴ os valores médios estimados do período de pico em período de tempestade, para cada localização, verificaram-se que estavam entre os 11,64 e os 11,37 segundos, valores típicos de ondulação.
- ∴ relativamente aos valores médios referentes a  $Hs_{máx}$  e  $Hs_{méd}$ , observaram-se valores entre 4,10 m e 3,93 m e 3,60 m e 3,51 m, respectivamente.

Os valores máximos e mínimos da intensidade energética e dos parâmetros que a definem ( $H_s$ ,  $T_p$  e  $D$ ) foram observados nas localizações nº24 e nº 10, respectivamente.

Para definir um período de tempestade, o Instituto Hidrográfico define, para a costa Oeste e Sul, condições de agitação cujo valor de altura de onda significativa seja superior a 5 e 3 metros, respectivamente. Neste trabalho foi realizada uma comparação dos resultados da intensidade energética resultante, para diferentes valores do limiar de definição de períodos de tempestade, nomeadamente  $H_s$  igual 3, 4 e 5 metros. Com base nos resultados, propôs-se que fosse considerado, para definição de períodos de temporal,  $H_s$  superior a 3 metros, para que a presente metodologia pudesse ser, geograficamente, o mais abrangente possível, podendo vir a ser utilizada tanto na costa oeste como na costa sul de Portugal continental e insular.

Com vista à classificação por classes dos temporais marítimos estimados, compararam-se três opções, todas baseadas na intensidade energética de cada temporal. A classificação de temporal fundamentada em *Mendoza e Jimenez* (2011) foi a utilizada para a caracterização da zona de estudo, de acordo com as seguintes classes de intensidade energética: Fraca ( $24 < E < 250 \text{ m}^2 \text{ h}$ ); Moderada ( $251 < E < 500 \text{ m}^2 \text{ h}$ ); Significativa ( $501 < E < 700 \text{ m}^2 \text{ h}$ ); Severa ( $701 < E < 1200 \text{ m}^2 \text{ h}$ ); Extrema ( $E > 1200 \text{ m}^2 \text{ h}$ ). Uma nova classificação, associada a limiares superiores de  $E$  para as classes mais altas (Significativa, Severa e Extrema) de temporais conduz a uma distribuição decrescente do número de temporais por ordem crescente de classe, como é intuitivamente expectável. No entanto, esta nova classificação carece de validação, não tendo, por isso, sido a utilizada para a caracterização do litoral de Espinho.

Como referido, analisou-se o valor da intensidade energética, em cada temporal observado, nos 26 pontos definidos na batimétrica dos 15 metros. É importante referir que as localizações mais a Norte obtiveram valores médios de intensidade energética cerca de 14% superiores aos verificados no centro da zona considerada, o que revela que esse sector é muito mais enérgico que os restantes. Associados a este aspecto, foram observadas mais tempestades da classe Extrema nessas mesmas localizações. Contudo, apesar das diferenças identificadas, o trecho enquadra-se todo na classe de intensidade Severa.

Uma vez identificadas as zonas mais enérgicas da frente de Espinho, será possível tomar medidas de gestão costeira mais informadas, de forma a minorar os efeitos de destruição de património, erosão costeira e inundações nesse litoral. Será ainda possível recorrer a este tipo de metodologia e classificação para estudar a intensidade energética de outras zonas da costa, uma vez que o valor mínimo de altura de onda significativa em períodos de tempestade definido foi de 3 metros, que equivale ao valor de referência para a costa Sul de Portugal.

Como possíveis trabalhos futuros, poderão ser classificados, a partir das várias classificações utilizadas neste trabalho, outras zonas do litoral de Portugal continental e, também, uma adaptação aos Arquipélagos da Madeira e Açores. Outro desenvolvimento que poderá ser tido em conta é a utilização de outras variáveis para definição de intensidade energética, como por

exemplo, o fluxo de energia ou potência da onda (e.g., utilizado no “ONDATLAS” - Atlas de Ondas Marítimas, 2003) e a quantidade de movimento associada à onda (Basco e Mahmoudpour, 2012) que representam também quantidades relacionadas com a energia da onda, e permitirão quantificar, de forma alternativa, a intensidade da ação marítima.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Battjes, J. A. (1994) – *Shallow water wave modelling, Proc. Int. Symp.: Waves – Physical and Numerical Modeling*, Vancouver, University of British Columbia.

Booij, N., R.C. Ris, L.H. Holthuijsen (1999) – *A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation*; J. Geoph. Research.

Carvalho, J. J. R.; Barcelô, J. P. (1966) – *Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano – Contribuição para o seu Estudo*. Memória nº 290, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 34 p.

Coelho, C., Silva, R., Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F. (2006) – *A Vulnerability Analysis Approach for the Portuguese West Coast. In Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation*, 91, pp. 251–262, (Ed. by V. Popov, and C. A. Brebbia. Wessex Institute of Technology, WIT Transactions on Ecology and the Environment, UK).

Costa, M.; Silva, R.; Vitorino, J. (2011) – *Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa*. 2as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Associação Internacional de Navegação – Sines. Anais..., 20 p.

Dias, J. A.; Ferreira, O.; Pereira, A. R. (1994) – *Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré*. Edição electrónica de 2005: [w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks](http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks).

Dias, J. A. & Taborda, R. P. M. (1992) – *Tidal gauge data in deducing secular trends of relative sea level and crustal movements in Portugal*. Journal of Coastal Research, 8 (3): 655-659. Fort Lauderdale.

Dodet, G.; Bertin, X.; Taborda, R. (2010) – *Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades*. Ocean Modelling, 31 (3-4): 120-131.

Hasselmann, K. e co-autores, (1973) – *Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Project (JONSWAP)*, 12A8, 1-95. Dtsch.Hydrogr. Z. Suppl

Holthuijsen, Leo H. (2007) – *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and P.A.E.M. Janssen (1994) – *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press

Mendoza, E. T., Jimenez, J. A. e Mateo, J. (2011) – *A coastal Storm intensity scale for the Catalan Sea (NW Mediterranean)*, 11, 2453-2462. Natural Hazards and Earth System Sciences.

Morais, C. C. & Abecassis, F. (1978) – *Storm Surge at Leixões*. Memória LNEC, 503. Lisboa.

Pereira, Ana I. dos Santos (2008) – *Modelação de Agitação Marítima em Zonas Costeiras*. Tese de Mestrado em Engenharia e Arquitectura Naval. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa

Ris, R. C. (1997) – *Spectral modeling of wind waves in coastal areas*. Ph. D. thesis. Delft University of Technology, 160 pp.

Sancho, F., Heitor, D. S. e Neves, M. G. (2013) – *Intensidade Energética sob Temporais Marítimos: Proposta de Metodologia e Aplicação ao Litoral de Espinho*. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC, Lisboa.

Santos, F. D., Miranda, P. (Gradiva, 2006) – *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II*. Gradiva, Lisboa.

Silva, D., Rusu, E., Soares Guedes, C. (2009) – *Modelação das condições marítimas na zona costeira da Figueira da Foz, com o modelo espectral SWAN*. 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Funchal, Madeira.

Silva, F. S. (2009) – *Calibração e Validação do Modelo Espectral de Previsão da Agitação Marítima SWAN em Zonas Costeiras*. Tese de Mestrado em Oceanografia. Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente.

SWAN, (2013) – *SWAN USER MANUAL*, SWAN Cycle III version 40.91AB. Delft University of Technology.

SWAN (2013b) – *SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION*, SWAN Cycle III version 40.91AB. Delft University of Technology.

Trigo, R. M. (1996) – *Classificação de Padrões de Circulação Atmosférica para Portugal*. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências de Lisboa.

USACE (2006) – *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual*, 1110-2-1100, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).

Westhuysen, A. van der, Zijlema, M. e Battjes, J. (2007) – *Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water*. Coastal Engineering, 54, 151-171.



**ANEXO A – FICHEIRO *TPAR* (CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAN)**

TPAR

20130228.150000	1.0	5.9	10.	2.
20130228.160000	1.2	5.4	-10	2.
20130228.170000	1.4	5.6	10.	2.
20130228.180000	1.6	5.8	-5.	2.
20130228.190000	1.8	5.6	10.	2.
20130228.200000	1.6	5.4	10.	2.
20130228.210000	1.4	5.2	15.	2.
20130228.220000	1.2	5.5	10.	2.
20130228.230000	1.0	5.1	12.	2.



**ANEXO B – OUTPUT DO SWAN EM FORMATO ASCII**

```
%
%
% Run:1_y    Table:BOIAS_1          SWAN version:40.91A
%
%      Time           Hsig           Dir           Tm01
%      [ ]           [m]           [degr]        [sec]
%
20130228.150000      1.00104          9.991          4.9074
20130228.170000      1.40199          9.977          4.6590
20130228.190000      1.80273          9.989          4.6591
20130228.210000      1.39837         14.875          4.3185
20130228.230000      1.00134         11.992          4.2367
```



**ANEXO C – SIMULAÇÃO HARIGVLIET ORIGINAL**

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'F31har01' 'F31'
$
$ Field case: the Haringvliet test
$ Time of simulation: 21:00 UTC on October 14, 1982
$
$*****MODEL INPUT*****
$
SET LEVEL 0.30
$
CGRID 6960.2 0. 0. 14789.8 22000. 98 88 CIRCLE 36 0.0521 1. 31
$
$ NOTE: use exception value (-99 in this case) here to get
$       good load balancing!
INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 87 116 250. 250. EXC -99.
READINP BOTTOM 1. 'f31hari.bot' 3 0 FREE
$
WIND 12. 8.8
$
BOU SIDE W CCW CON FILE 'f31har01.bnd' 1
$
GEN3
BREAKING
FRICTION
TRIADS
$
$*****
$
POINTS 'BUOYS' FILE      'f31hari.loc'
TABLE  'BUOYS' HEAD      'f31har01.tab' DIST DEP HS RTP TM01 TM02 FSPR DIR
FORCE
TABLE  'BUOYS' NOHEAD 'f31har01.tbl' HS RTP TM01 TM02 FSPR
SPEC   'BUOYS' SPEC1D 'f31har01.spc'
$
$ generate binary Matlab-file for block-output
BLOCK  'COMPGRID' NOHEAD 'f31har01.mat' LAYOUT 3 HS TM01 FSPR
$
$ set itest=1 in order to get detailed information
TEST 1,0
COMPUTE
STOP

```



**ANEXO D – TESTE Nº 1 EFECTUADO PARA O EIXO (X,11000)**

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'NON-STAT' '1_y'
$
$ Corrida para o caso em que a variável tempo é usada
$ Início da corrida: 15:00 UTC February 28, 2013
$
$*****MODEL INPUT*****
$
SET LEVEL 0.30 CART
$
MODE NONST TWOD
$
COORDINATES CART
$
CGRID REG 6960.2 0. 0. 14789.8 22000. 98 88 CIRCLE 36 0.0521 1. 31
$
$ ***** Defining the grids of bottom *****
$
INPgrid BOTtom REG 0. 0. 0. 87 116 250. 250. EXC -99.
READinp BOTTOM 1.0 'testetempo.bot' 3 0 FREE
$
WIND 12. 8.8
$
BOUND SHAP JON
$BOUN SIDE W CCW CON FILE 'testetempo_.bnd' 1
BOUN SIDE W CCW CON FILE 'testetempo_TPAR1.bnd' 1
$
$
GEN3 WESTH
BREaking
FRICtion
TRIad
$
$***** Numerics *****
$
PROP BSBT
NUMeric ACCUR NONSTAT 10
$
$*****MODEL OUTPUT*****
$FRAme 'GRID_2' 14354.7 5500. 0. 7394.5 11000. 98 88
NGRIId 'GRID_2' 14354.7 5500. 0. 7394.5 11000. 98 88
NESTout 'GRID_2' 'GRID_2_NEST' OUT 20130228.150000 2 HR
$BLOck 'GRID_2' NOHEADer 'testetempoHSign_2.mat' LAYout 3 HS XP YP BOTL
DIR OUT 20130228.150000 2 HR
POIN 'GRID_2_1' 18000. 5500.
TAB 'GRID_2_1' HEAD 'testetempo_GRID_1.tbl' TIME HS DIR TM01 OUT
20130228.150000 2 HR
POIN 'GRID_2_2' 18000. 11000.
TAB 'GRID_2_2' HEAD 'testetempo_GRID_2.tbl' TIME HS DIR TM01 OUT
20130228.150000 2 HR
POIN 'GRID_2_3' 18000. 16500.
TAB 'GRID_2_3' HEAD 'testetempo_GRID_3.tbl' TIME HS DIR TM01 OUT
20130228.150000 2 HR
BLOck 'COMPGRID' NOHEADer 'testetempoHSign.mat' LAYout 3 HS XP YP BOTL
DIR OUT 20130228.150000 2 HR
POIN 'BOIAS_1' 6960.2 11000.

```

# CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE ENERGÉTICA NO LITORAL DE ESPINHO

TAB	'BOIAS_1'	HEAD	'testetempo_1.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_2'	7699.	11000.					
TAB	'BOIAS_2'	HEAD	'testetempo_2.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_3'	8439.	11000.					
TAB	'BOIAS_3'	HEAD	'testetempo_3.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_4'	9178.	11000.					
TAB	'BOIAS_4'	HEAD	'testetempo_4.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_5'	9918.	11000.					
TAB	'BOIAS_5'	HEAD	'testetempo_5.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_6'	10657.	11000.					
TAB	'BOIAS_6'	HEAD	'testetempo_6.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_7'	11396.	11000.					
TAB	'BOIAS_7'	HEAD	'testetempo_7.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_8'	12136.	11000.					
TAB	'BOIAS_8'	HEAD	'testetempo_8.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_9'	12875.	11000.					
TAB	'BOIAS_9'	HEAD	'testetempo_9.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_10'	13615.	11000.					
TAB	'BOIAS_10'	HEAD	'testetempo_10.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_11'	14354.	11000.					
TAB	'BOIAS_11'	HEAD	'testetempo_11.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_12'	15094.	11000.					
TAB	'BOIAS_12'	HEAD	'testetempo_12.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_13'	15833.	11000.					
TAB	'BOIAS_13'	HEAD	'testetempo_13.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_14'	16573.	11000.					
TAB	'BOIAS_14'	HEAD	'testetempo_14.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_15'	17312	11000.					
TAB	'BOIAS_15'	HEAD	'testetempo_15.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_16'	18051.	11000.					
TAB	'BOIAS_16'	HEAD	'testetempo_16.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_17'	18791.	11000.					
TAB	'BOIAS_17'	HEAD	'testetempo_17.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_18'	19530.	11000.					
TAB	'BOIAS_18'	HEAD	'testetempo_18.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_19'	20270.	11000.					
TAB	'BOIAS_19'	HEAD	'testetempo_19.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_20'	21009.	11000.					
TAB	'BOIAS_20'	HEAD	'testetempo_20.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	OUT
20130228.150000	2	HR						
POIN	'BOIAS_21'	21749.	11000.					



---

```
TAB  'BOIAS_21'  HEAD  'testetempo_21.tbl'  TIME  HS  DIR  TM01  OUT
20130228.150000 2  HR
$
TEST 0,0
COMPUTE STAT 20130228.150000
COMPUTE NONSTAT 20130228.150000 2  HR 20130228.230000
STOP
$
```



## ANEXO E – CÓDIGOS ‘TESTEBASE3.M’ E ‘TESTEBASE4.M’ UTILIZADOS NO MATLAB®

``TESTEBASE3.m'`

```
clear all
load('teste_OFF_HSign.mat')
h01_00=double(Hsig_19530101_000000);
figure(1)
surf(h01_00)
figure(2)
contourf(h01_00)
h01_06=double(Hsig_19530101_060000);
figure(3)
surf(h01_06)
figure(4)
contourf(h01_06)
h01_12=double(Hsig_19530101_120000);
figure(5)
surf(h01_12)
figure(6)
axis equal
contourf(d01_00)
x=double(Xp);
y=double(Yp);
surf(x)
x(:,1);
xx=x(1,:);
surf(y)
y(:,1);
yy=y(:,1);
u=cosd(d01_00);
v=sind(d01_00);
figure(7)
quiver(x,y,u,v);
axis equal
b=double(Botlev);
figure(8)
surf(b)
figure(9)
contourf(b)
```

``TESTEBASE4.m'`

```
clear all
load('teste_OFF_HSign.mat')

figure(1)
b=double(Botlev);
```

```
[c2]=contourf(Xp,Yp,b,[-50 0:10:50, 100, 200, 500, 1000]); axis('equal')
clabel(c2,'FontSize',8), caxis([-10 100])
colormap winter, cmap = colormap;
for i=1:length(cmap), cmap1(i,:)=cmap(length(cmap)+1-i,:); end
colormap(cmap1), colorbar
```

```
figure(2)
h01_00=double(Hsig_19530102_180000);
HH=h01_00;
%contourf(h01_00)
[c]=contourf(Xp,Yp,HH,[0:0.25:10]); axis('equal')
clabel(c,'FontSize',8), caxis([0 5])
colormap bone, cmap = colormap;
for i=1:length(cmap), cmap1(i,:)=cmap(length(cmap)+1-i,:); end
colormap(cmap1), colorbar
```

```
figure(3)
d01_00=double(Dir_19530102_180000);
x=double(Xp);
y=double(Yp);
xx=x(1,:);
yy=y(:,1);
u=cosd(d01_00);
v=sind(d01_00);
[c2]=contour(xx,yy,b,[-50 0:10:50, 100, 200, 500, 1000],'k');
axis('equal'), hold on
quiver(x,y,u,v);
hold off
```

**ANEXO F – CÓDIGO ‘NAUT\_CART.M’ UTILIZADO NO MATLAB®**

```
fn = 'TPAR_2003_2009.txt';
fid = fopen(fn);
str = fgetl(fid);
s = textscan(fid,'%s%f%f%f%f');
fclose(fid);

%theta = mod(450-s{4},360);
theta = 270. - s{4};
s2 = cell2mat(s{1});

fn2 = [fn(1:end-4) '_cart_2.txt'];

fid2 = fopen(fn2,'w');
fprintf(fid2,'TPAR\n');
for i = 1:length(s{1})
    fprintf(fid2,'%s %.2f %.2f %.2f
%.2f\n',s2(i,:),s{2}(i),s{3}(i),theta(i),s{5}(i));
end
fclose(fid2);
```



## ANEXO G – SIMULAÇÃO PARA O PERÍODO DE 2003 ATÉ 2009 – FICHEIRO 'OFF\_2003\_2009.SWN'

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'ESPINHO_OFF' '6'
$
$ Corrida não estacionária, para a malha offshore ao largo de Espinho
$ Início da corrida: 00:00 UTC 01 Jan 2003
$ Fim da corrida: 18:00 UTC 31 Mar 2009
$
$*****MODEL INPUT*****
$
SET LEVEL 2.0 CART
$
MODE NONST TWOD
$
COORDINATES CART
$
CGRID REG 463000. 4487000. 0. 70000. 100000. 140 200 CIRCLE 30 0.04 0.8
$
$ ***** Defining the grids of bottom *****
$
INPgrid BOTtom REG 463000. 4487000. 0. 140 200 500. 500. EXC -99.
READinp BOTTOM 1.0 'Espinho_offshore3_xyz.bot' 3 0 FREE
$
WIND 0. 8.8
$
BOUND SHAP JON
BOUN SIDE W CCW CON FILE 'TPAR_2003_2009_W_cart_2.txt' 1
BOUN SIDE N CCW CON FILE 'TPAR_2003_2009_N_cart_2.txt' 1
BOUN SIDE S CCW CON FILE 'TPAR_2003_2009_S_cart_2.txt' 1
$
GEN3 WESTH
BREaking
FRICtion
TRIad
SETUP
$
$***** Numerics *****
$
PROP BSBT
NUMeric ACCUR NONSTAT 10
$
$*****MODEL OUTPUT*****
$
POIN 'B_1' 524500. 4532700.
TAB 'B_1' HEAD 'tabela_b_1.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_2' 524500. 4533200.

```

# CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE ENERGÉTICA NO LITORAL DE ESPINHO

TAB	'B_2'	HEAD	'tabela_b_2.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_3'	524500. 4533700.							
TAB	'B_3'	HEAD	'tabela_b_3.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_4'	524500. 4534200.							
TAB	'B_4'	HEAD	'tabela_b_4.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_5'	524800. 4534700.							
TAB	'B_5'	HEAD	'tabela_b_5.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_6'	525000. 4535200.							
TAB	'B_6'	HEAD	'tabela_b_6.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_7'	525000. 4535700.							
TAB	'B_7'	HEAD	'tabela_b_7.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_8'	524900. 4536200.							
TAB	'B_8'	HEAD	'tabela_b_8.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_9'	524900. 4536700.							
TAB	'B_9'	HEAD	'tabela_b_9.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_10'	525100. 4537200.							
TAB	'B_10'	HEAD	'tabela_b_10.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_11'	525200. 4537700.							
TAB	'B_11'	HEAD	'tabela_b_11.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_12'	525300. 4538200.							
TAB	'B_12'	HEAD	'tabela_b_12.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_13'	525400. 4538700.							
TAB	'B_13'	HEAD	'tabela_b_13.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_14'	525400. 4539200.							
TAB	'B_14'	HEAD	'tabela_b_14.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_15'	525300. 4539700.							
TAB	'B_15'	HEAD	'tabela_b_15.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_16'	525300. 4540200.							
TAB	'B_16'	HEAD	'tabela_b_16.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_17'	525500. 4540700.							
TAB	'B_17'	HEAD	'tabela_b_17.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_18'	525500. 4541200.							
TAB	'B_18'	HEAD	'tabela_b_18.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									
POIN	'B_19'	525500. 4541700.							
TAB	'B_19'	HEAD	'tabela_b_19.tbl'	TIME	HS	DIR	TM01	DSPR	OUT
20030101.000000 6 HR									



```
POIN 'B_20' 525300. 4542200.
TAB 'B_20' HEAD 'tabela_b_20.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_21' 524900. 4542700.
TAB 'B_21' HEAD 'tabela_b_21.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_22' 525000. 4543200.
TAB 'B_22' HEAD 'tabela_b_22.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_23' 525200. 4543700.
TAB 'B_23' HEAD 'tabela_b_23.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_24' 525200. 4544200.
TAB 'B_24' HEAD 'tabela_b_24.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_25' 525300. 4544700.
TAB 'B_25' HEAD 'tabela_b_25.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
POIN 'B_26' 525400. 4545200.
TAB 'B_26' HEAD 'tabela_b_26.tbl' TIME HS DIR TM01 DSPR OUT
20030101.000000 6 HR
$
TEST 0,0
COMPUTE STAT 20030101.000000
COMPUTE NONSTAT 20030101.000000 6 HR 20090331.180000
STOP
$
```



**ANEXO H – CÓDIGO ‘INTENSIDADE.M’ UTILIZADO NO MATLAB®**

```

clear all
fid=fopen('tabela_b_1.tbl');
C=textscan(fid,'%s %f %f %f %f %f');
fclose(fid);

time1=C{1};
Hs=C{2};
Dir=C{3};
Tp=C{4};
dspr=C{5};

limiar_Hs=3;

% time3= tempo em dias, em formato de "serial date number" do
Matlab

for i=1:length(Hs)
a=time1{i}; ano=a(1:4); mes=a(5:6); dia=a(7:8); hora=a(10:11);
time3(i,:)=datenum(str2num(ano),str2num(mes),str2num(dia),...
    str2num(hora),0,0);
end
%break

j=1; % j=contador de Hs>=limiar
for i=1:length(Hs)
    if Hs(i) >= limiar_Hs;
        Hs_storm(j)=Hs(i);
        time_storm(j)=time3(i);
        dir_storm(j)=Dir(i);
        if dir_storm(j)>=0 && dir_storm(j)<90
            dir_storm(j)=dir_storm(j)+360;
        end
        Tp_storm(j)=Tp(i);
        j=j+1;
    end
end

% Is=intensidade energética
k=1; % k=contador de tempestades independentes,ie, com inter-
valo entre elas superior ao periodo de calma
duracao_calma=2; %periodo em dias da calma
dt=6.; %intervalo entre dados em horas
Is(k)=dt*Hs_storm(1)^2.;
Is_HSmax(k)=Hs_storm(1);
Is_HSmean(k)=Hs_storm(1);
Is_Tpmax(k)=Tp_storm(1);
Is_Tpmean(k)=Tp_storm(1);
Is_dir(k)=dir_storm(1);
Is_time(k)=time_storm(1);
Is_duration(k)=6;
m=1;

```

```
for j=2:length(Hs_storm);
    if time_storm(j)-time_storm(j-1)>=duracao_calma
        k=k+1;
        Is(k)=dt*Hs_storm(j)^2.;
        Is_time(k)=time_storm(j);
        Is_duration(k)=6;

        Is_HSmean(k-1)=Is_HSmean(k-1)./m;
        Is_Tpmean(k-1)=Is_Tpmean(k-1)./m;
        Is_dir(k-1)=Is_dir(k-1)./m;

        Is_HSmax(k)=Hs_storm(j);
        Is_HSmean(k)=Hs_storm(j);
        Is_Tpmax(k)=Tp_storm(j);
        Is_Tpmean(k)=Tp_storm(j);
        Is_dir(k)=dir_storm(j);
        m=1;
    else
        Is(k)=dt*Hs_storm(j)^2.+Is(k);
        Is_duration(k)=Is_duration(k)+6;
        Is_HSmean(k)=Hs_storm(j)+Is_HSmean(k);
        Is_HSmax(k)=max(Is_HSmax(k),Hs_storm(j));
        Is_dir(k)=dir_storm(j)+Is_dir(k);
        Is_Tpmean(k)=Tp_storm(j)+Is_Tpmean(k);
        Is_Tpmax(k)=max(Is_Tpmax(k),Tp_storm(j));
        m=m+1;
    end
end

Is_HSmean(k)=Is_HSmean(k)./m;
Is_Tpmean(k)=Is_Tpmean(k)./m;
Is_dir(k)=Is_dir(k)./m;

clear data ano mes dia hora;
data=datevec(Is_time);
ano(:,1)=data(:,1); mes(:,1)=data(:,2); dia(:,1)=data(:,3);
hora(:,1)=data(:,4);

%break
mycell=cell(length(Is),8);
for k=1:length(Is);

b1(k,1:11)=[num2str(ano(k,1),'%4d'),num2str(mes(k,1),'%02d'),num2
str(dia(k,1),'%02d'),'.',num2str(hora(k,1),'%02d')];
mycell(k,1)={b1(k,:)};
mycell(k,2)=num2cell(Is(k));
mycell(k,3)=num2cell(Is_duration(k));
mycell(k,4)=num2cell(Is_HSmax(k));
mycell(k,5)=num2cell(Is_HSmean(k));
mycell(k,6)=num2cell(Is_Tpmax(k));
mycell(k,7)=num2cell(Is_Tpmean(k));
mycell(k,8)=num2cell(Is_dir(k));
end

[nrows,ncols]= size(mycell);
filename = 'Is_out_1.dat';
```

```
fid = fopen(filename, 'w');
for row=1:nrows;
    fprintf(fid, '%s %10.3f %4d %10.3f %10.3f %10.3f %10.3f
%10.3f \r\n', mycell{row,:});
end
fclose(fid);

%save Is_output2.dat b1 '-ascii' '-double';
```



**ANEXO I – ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA MÁXIMA, PERÍODO DE PICO MÁXIMO E DIRECÇÃO DE CADA TEMPORAL, NAS LOCALIZAÇÃO Nº 1, Nº 13 E Nº 26, PARA O PERÍODO DE TEMPO TOTAL DE 56 ANOS**

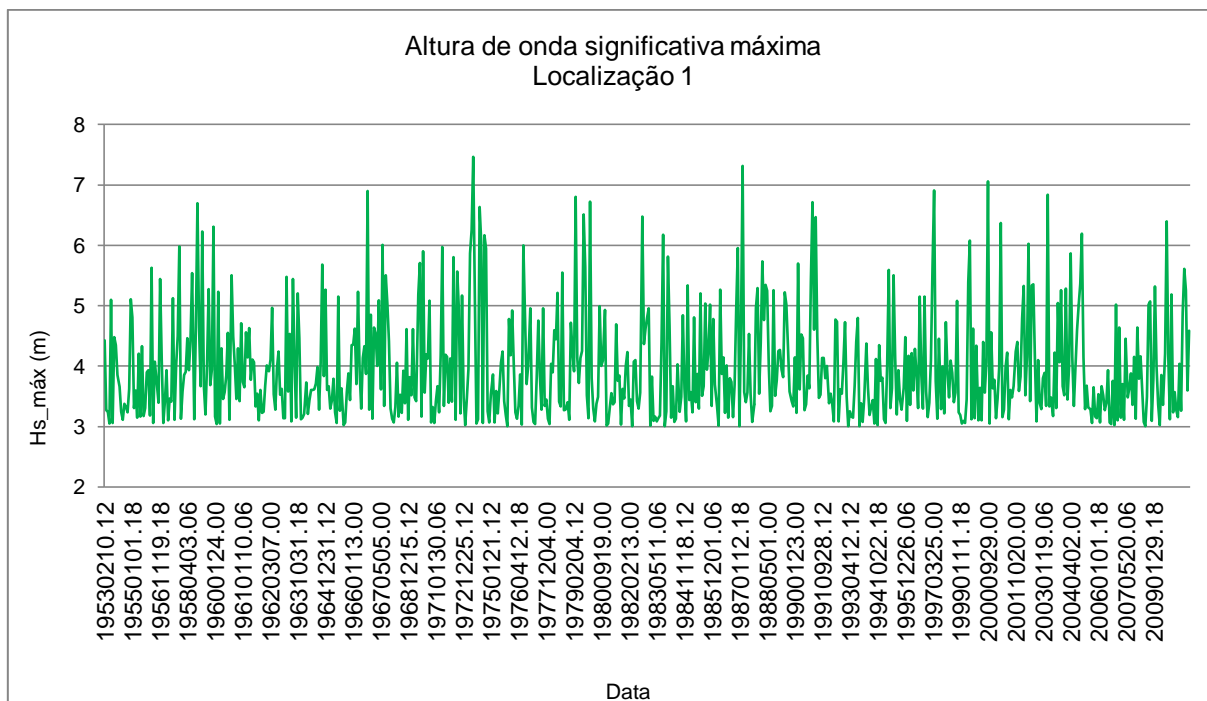


Figura I.1 - Altura de onda significativa máxima para o período de 56 anos, na localização nº1.

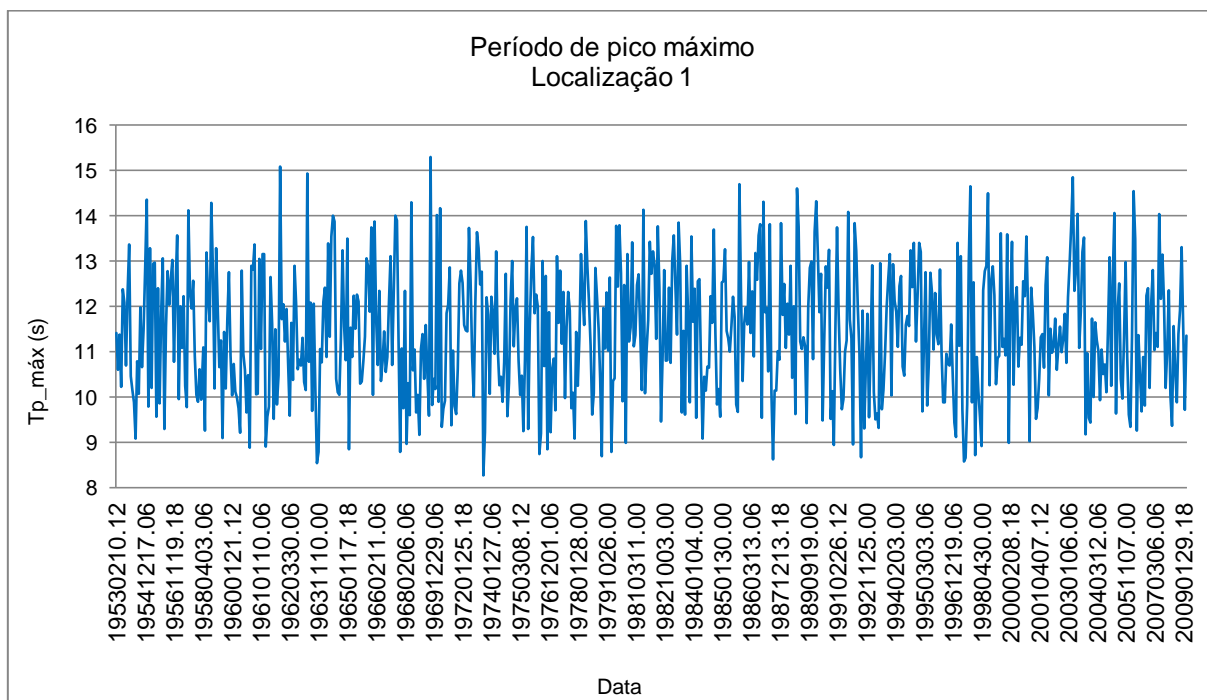


Figura I.2 - Período de pico máximo para o período de 56 anos, na localização nº1.

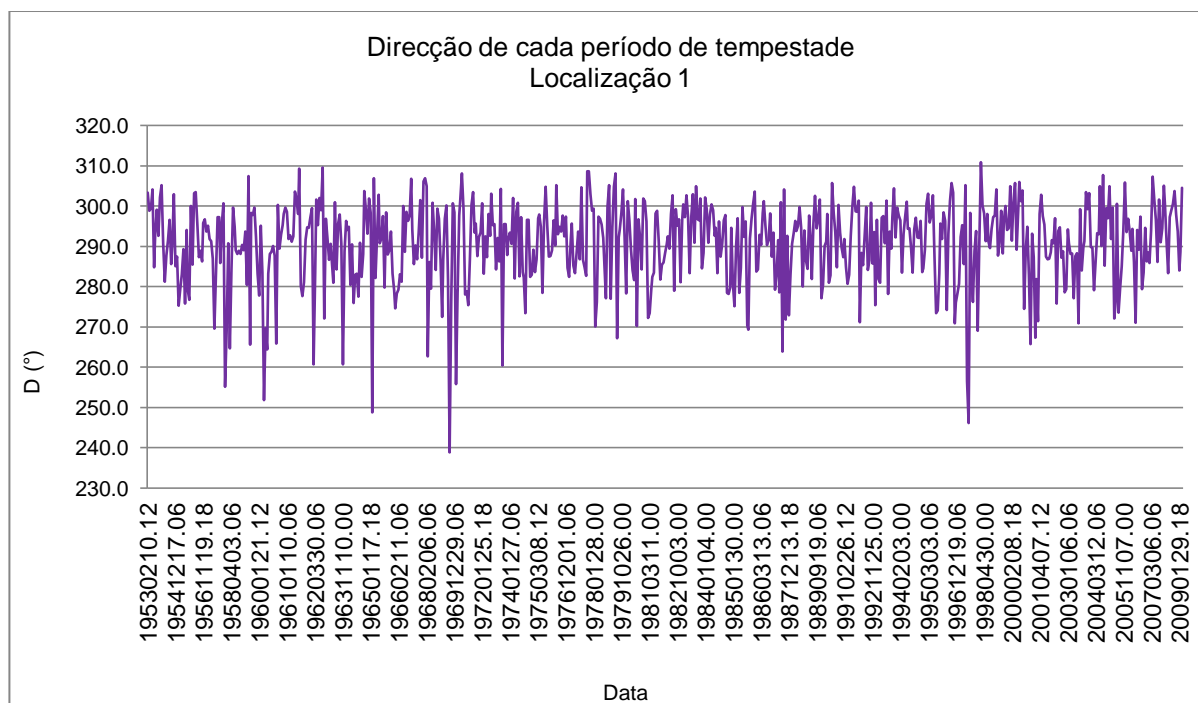


Figura I.3 - Direção de onda para o período de 56 anos, na localização nº1.

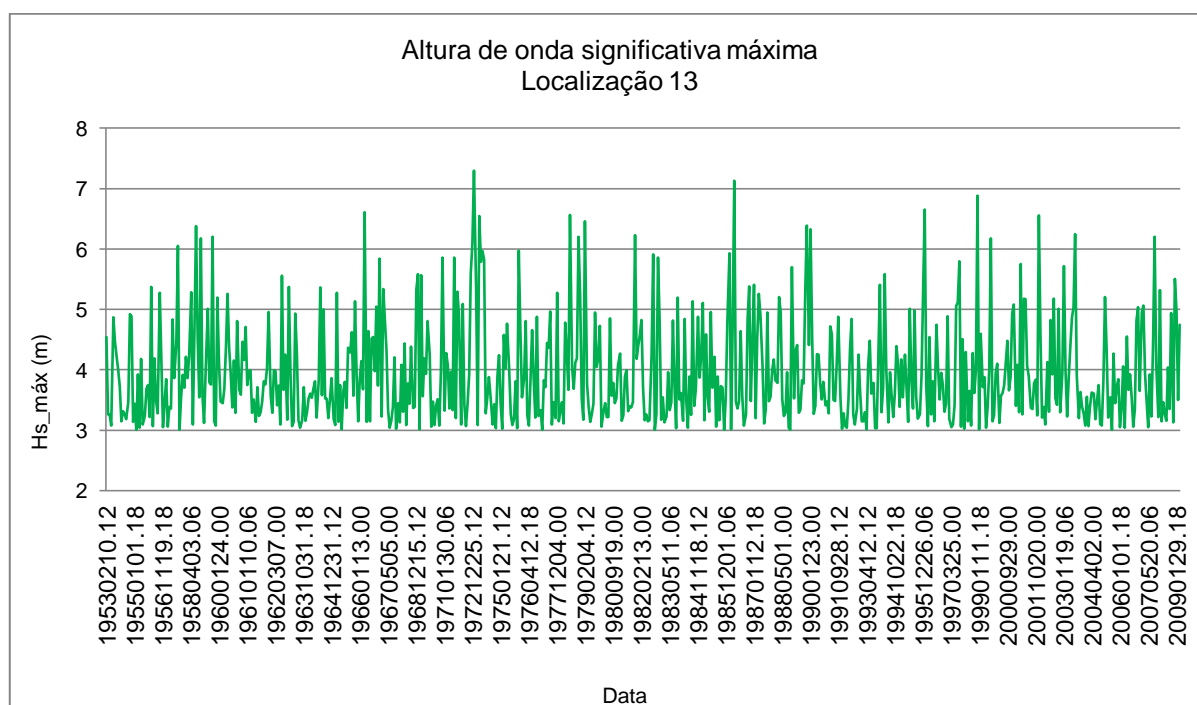


Figura I.4 - Altura de onda significativa máxima para o período de 56 anos, na localização nº13.



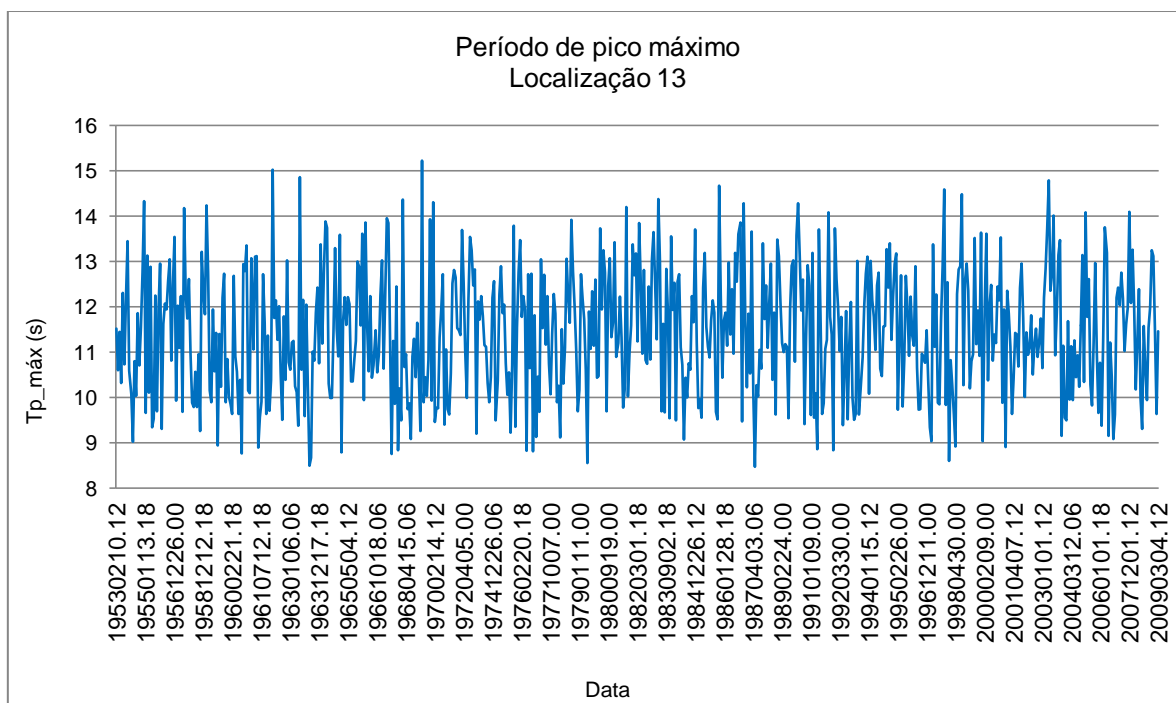
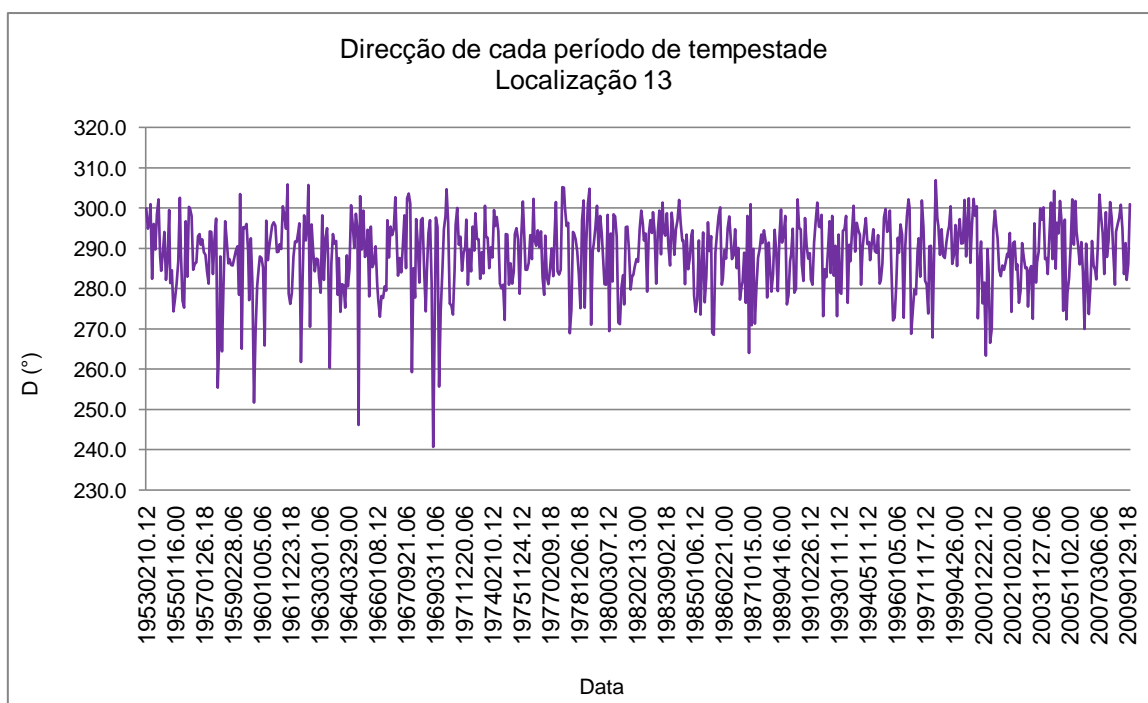


Figura I.5 - Período de pico máximo para o período de 56 anos, na localização nº13.



Figural.6 - Direcção de onda para o período de 56 anos, na localização nº13.

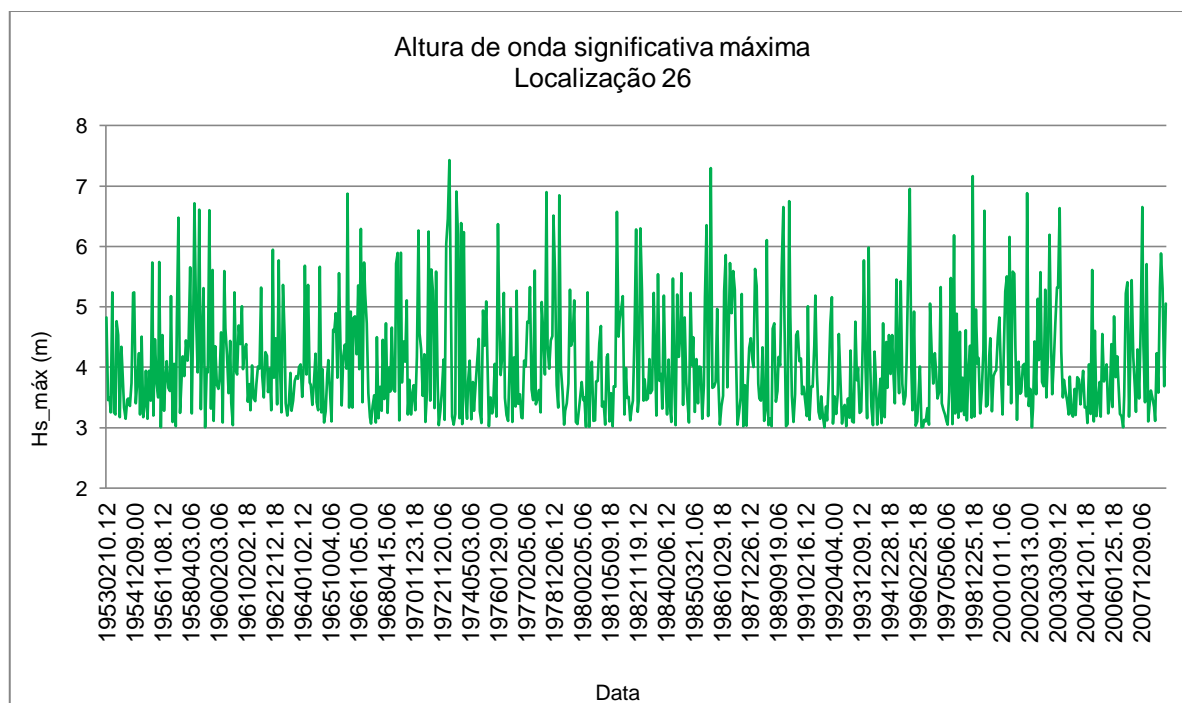


Figura I.7 - Altura de onda significativa máxima para o período de 56 anos, na localização nº26.

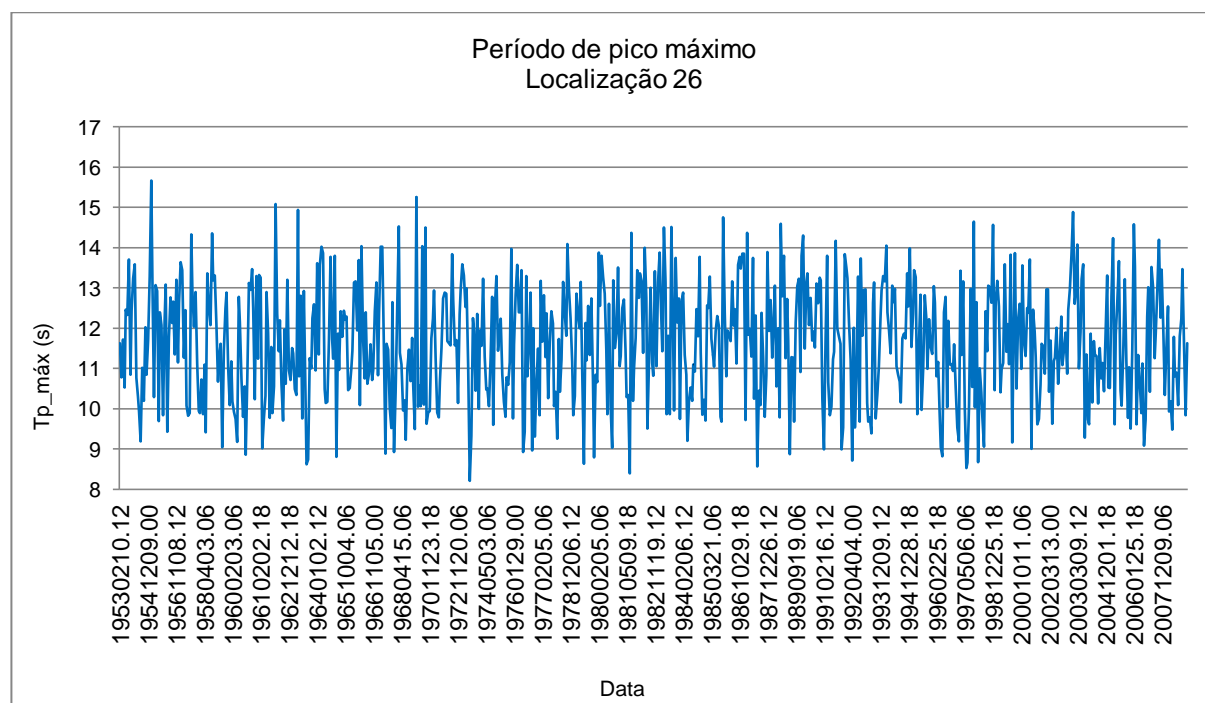


Figura I.8 - Período de pico máximo para o período de 56 anos, na localização nº26.

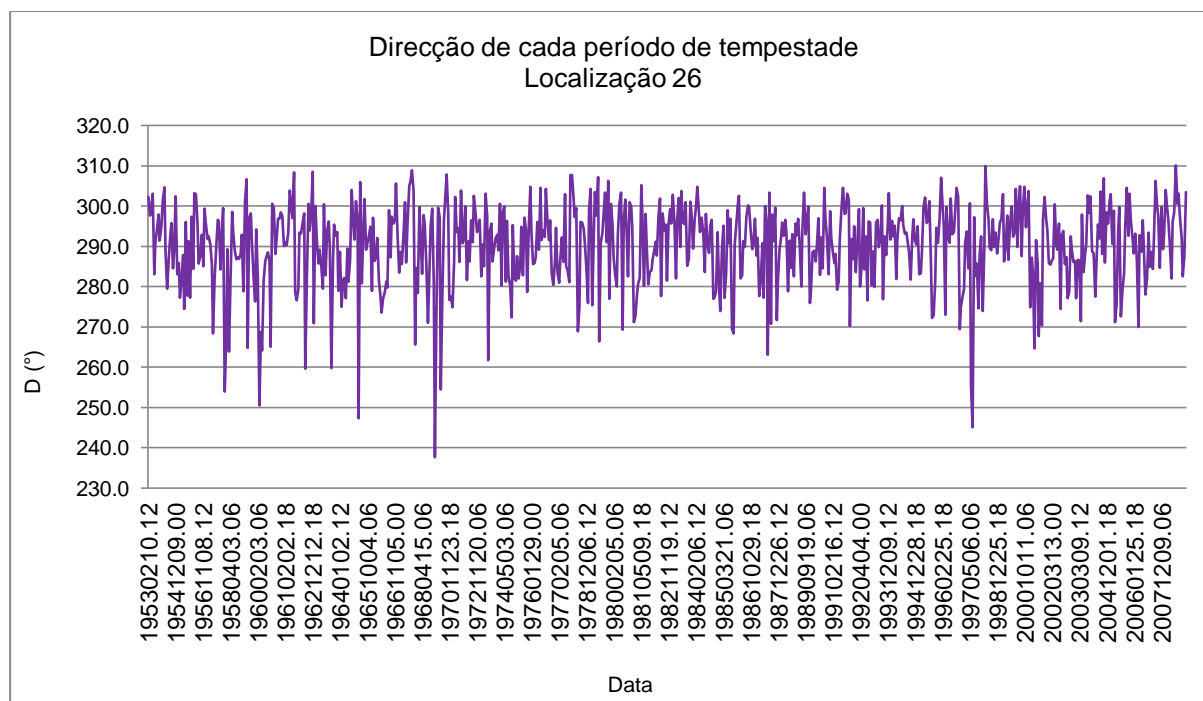


Figura I.9 - Direcção de onda para o período de 56 anos, na localização nº26.